



Alexandre Haruiti Anzai

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS PARA
ESTIMAÇÃO DA MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM
TEMPO REAL USANDO PMUs

Campinas

2013



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Alexandre Haruiti Anzai

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS PARA ESTIMAÇÃO DA MARGEM DE
ESTABILIDADE DE TENSÃO EM TEMPO REAL USANDO PMUS

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida por Alexandre Haruiti Anzai, e orientada pelo Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva

Campinas

2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

An98a Anzai, Alexandre Haruiti, 1978-
Aplicação de métodos de identificação de sistemas para estimação da margem de estabilidade de tensão em tempo real usando PMUs / Alexandre Haruiti Anzai. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Luiz Carlos Pereira da Silva.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. sistemas de energia elétrica. 2. Sistemas elétricos de potência. 3. Energia elétrica - Medição. I. Silva, Luiz Carlos Pereira da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Application of parametric system identification techniques for the real time estimation of the voltage stability margin using PMU data

Palavras-chave em inglês:

Electrical energy systems

Power electric systems

Electric Energy - Measurement

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Luiz Carlos Pereira da Silva [Orientador]

Geraldo Roberto Martins da Costa

Dilson Amancio Alves

Carlos Alberto de Castro Junior

Takaaki Ohishi

Data de defesa: 28-02-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Alexandre Haruiti Anzai

Data da Defesa: 28 de fevereiro de 2013

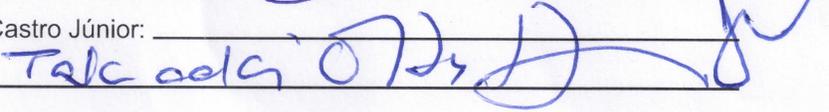
Título da Tese: "Aplicação de Métodos de Identificação de Sistemas para Estimação da Margem de Estabilidade de Tensão em Tempo Real Usando PMUs"

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva (Presidente): 

Prof. Dr. Geraldo Roberto Martins da Costa: _____

Prof. Dr. Dilson Amâncio Alves: 

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Júnior: _____

Prof. Dr. Takaaki Ohishi: 

Resumo

Esta tese apresenta resultados a respeito do desenvolvimento de uma ferramenta de monitoramento em tempo real da margem de estabilidade de tensão de sistemas de transmissão. O desenvolvimento tecnológico das unidades de medição fasorial (Phasor Measurement Units)(PMUs), facilitou a obtenção do estado do sistema, magnitude e ângulo de fase das tensões das barras, em tempo real. O acesso em tempo real do estado do sistema com maior precisão possibilitou a utilização de técnicas de identificação paramétricas de sistemas para estimar a margem de estabilidade de tensão. Nesta tese modelos auto-regressivos com entradas exógenas (Auto-Regressive Models with exogenous inputs)(ARX) lineares e não lineares foram calculados baseados em um banco de dados offline e utilizados para representar a relação entre as medidas das PMUs e a margem de estabilidade de tensão. Dois critérios para a alocação das PMUs na rede foram testados: a variância da tensão no banco de dados e o fator de participação modal. Os resultados mostram que o método proposto apresenta uma boa precisão na estimativa da margem tanto para casos de rede completa ou em condições de contingências. O fato desta estimativa necessitar de operações relativamente simples sobre os valores medidos e não em cálculos de diversas curvas PV, torna o método rápido o suficiente para ser implementado em tempo real.

Palavras-chave: Unidades de medição Fasorial, Estabilidade de Sistemas de Energia Elétrica, Processos Autoregressivos, Estabilidade de Tensão.

Abstract

This thesis presents results about the development of a tool for real time monitoring of the voltage stability margin of transmission systems. The advance of Phasor Measurement Units (PMU), has made it easier to obtain the system's state, voltage magnitude and phase angles of some buses in real time. The access of the accurate system's state in real time allows the utilization of parametric system identification techniques to estimate the voltage stability margin. In this thesis linear and nonlinear Auto-Regressive eXogenous inputs (ARX) models were calculated based on an offline database and utilized to represent the relation between the PMU measures and the voltage stability margin. Two criteria for the allocation of the PMUs in the network were tested: the voltage variance and the modal participation factor. The results demonstrate that the proposed method presents adequate accuracy for the estimation of the voltage stability margin even considering the occurrence of contingencies. The estimation is performed through the execution of relatively simple operations on the measured values instead of computing several PV curves, which makes it suitable for real time applications.

Key-words: Phasor Measurement Units, Power system stability, Autoregressive processes, Voltage Stability.

Índice

Índice	xi
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xviii
1 Introdução	1
1.1 Motivações para o estudo	1
1.2 Objetivos do trabalho	2
1.3 Estrutura da Tese	3
2 Estabilidade de Tensão	5
2.1 Introdução	5
2.2 Análise da Estabilidade de Tensão	7
2.2.1 Teoria de Bifurcação	8
2.3 Análise estática da estabilidade de tensão	12
2.3.1 Curvas PV e Curvas QV	14
2.3.2 Método de fluxo de carga da continuação	16
2.3.3 Margem de estabilidade de tensão (MET)	18
2.3.4 Análise Modal Estática	21
2.4 Análise de Sensibilidade e Índices	26
3 Identificação de Sistemas Dinâmicos	29

3.1	Introdução	29
3.2	Métodos de Identificação de Sistemas Dinâmicos	32
3.2.1	Classificação dos Métodos de Identificação de Sistemas	33
3.3	Representação de Sistemas Lineares	35
3.3.1	Representação de Sistemas Lineares Discretos no Tempo	36
3.4	Métodos de Identificação Paramétricos Lineares	38
3.4.1	Modelo Auto Regressivo com Entradas Exógenas (ARX)	39
3.4.2	Método de Mínimos Quadrados	40
3.5	Identificação Utilizando Sistemas Não Lineares	42
3.5.1	Representação de Sistemas Não Lineares	43
3.5.2	Métodos não Lineares de Identificação Paramétrica	44
3.5.3	Modelo Não Linear Auto Regressivo com Entradas Exógenas (NARX)	44
3.5.4	Estimador não linear Utilizando Redes Sigmoidais	46
3.5.5	Método de Mínimos Quadrados Não Linear	46
4	Monitoramento Baseado em Medição Fasorial Sincronizada	53
4.1	Introdução	53
4.2	Medição sincronizada e fasores	55
4.3	Descrição esquemática do equipamento	58
4.4	Qualidade da medição	60
4.5	Monitoramento da Margem de Estabilidade Utilizando PMUs	65
5	Metodologia Proposta para a estimação da MET	69
5.1	Introdução	69
5.2	Modelo do sistema	71
5.3	Modelo do Estimador	73
5.3.1	Detalhes da construção do banco de dados	75
5.4	Resultados da aplicação do modelo de estimação	79
5.4.1	Resultados com PMUs alocadas em todas as barras PQ	81

5.4.2	Alocação de PMUs	84
5.4.3	Resultados considerando alocação pelo critério da variância	89
5.4.4	Resultados considerando a alocação pelo critério do fator de participação modal	94
5.4.5	Resultados Considerando o critério TVE e ruído	111
6	Conclusões	121
6.1	Conclusões a respeito dos resultados obtidos	121
6.2	Possibilidades de trabalhos futuros	122
6.3	Trabalhos desenvolvidos durante o doutorado.	124
	Referências Bibliográficas	125

Lista de Figuras

2.1	Método de fluxo de carga da continuação	18
2.2	Exemplo de uma curva PV	20
2.3	Exemplo de curvas QV	20
3.1	Classificação dos métodos de estimação.	35
3.2	Diagrama de blocos do estimador não linear	45
4.1	Diagrama esquemático de um sistema contendo PMUs e suas conexões com uma PDC associada.	59
4.2	Diagrama esquemático de uma PMU.	59
4.3	Ilustração do critério TVE	61
5.1	Diagrama unifilar do sistema New England de 39 barras	73
5.2	Exemplo de uma curva diária de carga e as respectivas margens	78
5.3	Amostra de 10 dias contido no banco de dados.	79
5.4	Resultados considerando um modelo linear para toda a curva de carga.	80
5.5	Margem Estimada e Calculada - Modelo Linear	82
5.6	Margem Estimada e Calculada - Modelo não linear	83
5.7	zoom da região de carga pesada - Modelo não linear	83
5.8	Correlações com PMUs em todas as barras.	84
5.9	Gráfico com o espectro de variâncias do banco de dados	88
5.10	Diagrama unifilar do sistema com as barras com maior variância marcadas.	88
5.11	Margens - critério da variância - Modelo Linear	89

5.12	Máximo erro absoluto - critério da variância - Modelo Linear	90
5.13	Margens - critério da Variância - Modelo não linear	91
5.14	Zoom na região de carga pesada - Modelo não linear - critério da variância	92
5.15	Correlações das margens com PMUs alocadas pelo critério da variância.	93
5.16	Correlações considerando redução no número de PMUs - critério da variância.	94
5.17	Espectro dos fatores de participação reativo.	96
5.18	Espectro dos fatores de participação ativo.	96
5.19	Diagrama unifilar do sistema com as barras selecionadas pelos dois critérios marcadas.	98
5.20	Margens - critério do Fator de Participação Modal - Modelo Linear	99
5.21	Máximo erro absoluto - Modelo Linear - critério do Fator de Participação Modal.	100
5.22	Margens - critério do Fator de Participação Modal - Modelo não linear	101
5.23	Zoom da região de carga pesada - Modelo não linear	102
5.24	Correlações - critério do Fator de Participação Modal	103
5.25	Margens - Critério FPR barras (7,8,12,5,6) - Modelo linear.	104
5.26	Máximo erro absoluto - Critério FPR barras (7,8,12,5,6) - Modelo linear.	105
5.27	Método não linear critério somente FPR 5 barras (7,8,12,5,6)	106
5.28	Zoom da região de carga pesada - modelo não linear - FPR (7,8,12,5,6)	106
5.29	Correlações - Critério FPR - (7,8,12,5,6)	107
5.30	Comparações entre os critérios FPA+FPR e FPR - modelo linear	108
5.31	Comparações entre os critérios FPA+FPR e FPR - modelo não linear	109
5.32	Correlações - critério do Fator de Participação Modal Ativo e Reativo	110
5.33	Correlações - critério do Fator de Participação Modal Reativo	110
5.34	Magnitudes das tensões antes e após a aplicação do ruído barras(15,4,8,12,7)	112
5.35	Ângulos das tensões antes e após a aplicação do ruído - barras(15,4,8,12,7)	112
5.36	Margens considerando o TVE - modelo não linear - FPA+FPR (27,7,12,14,26)	113
5.37	Comparações com e sem ruído - modelo não linear	114
5.38	Margens considerando o TVE - modelo não linear - Variância(15,4,8,12,7)	115
5.39	Comparações entre as correlações - modelo não linear	116

5.40	Margens considerando o TVE de 0,5% - modelo não linear - Variância(15,4,8,12,7) .	117
5.41	Margens considerando o TVE de 0,5% - modelo não linear - FPA + FPR(27,7,12,14,26)	117
5.42	Comparações entre as correlações com $TVE \leq 0,5\%$ - modelo não linear	118
5.43	Comparações entre as correlações com $TVE \leq 0,1\%$ - modelo não linear	119

Lista de Tabelas

3.1	Valores de R_i em (3.36) para cada método.	52
4.1	Taxas de aquisição de fasores das PMUs requeridas pela norma	62
4.2	Requisitos para medição em regime permanente de sincrofasores	63
5.1	Divisão em patamares da curva diária.	81
5.2	Barras com maiores valores de variância no banco de dados em ordem decrescente .	87
5.3	Ordens dos polinômios $B(q)$ - Modelo Linear e critério da Variância	90
5.4	Barras com maiores valores de fator de participação modal em ordem decrescente .	95
5.5	Lista das barras selecionadas combinando o FPA e o FPR	97
5.6	Ordens dos polinômios $B(q)$ - Modelo Linear e critério de Fat. de Partc. Modal . .	100

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivações para o estudo

A vida cotidiana na sociedade moderna depende cada vez mais da confiabilidade e eficiência de sistemas responsáveis pela infra-estrutura das cidades, como por exemplo o sistema de fornecimento de energia elétrica, o sistema de fornecimento de água, o sistema de comunicação, só para citar alguns.

Com o crescimento do tamanho e complexidade das cidades a manutenção da confiabilidade e eficiência desses sistemas primordiais torna-se um verdadeiro desafio, principalmente para o setor responsável pelo sistema de fornecimento de energia elétrica, pois além da crescente importância que este segmento representa para o desenvolvimento econômico, é cada vez maior sua presença e interação com os demais sistemas.

Com este intuito esta tese propõe uma nova ferramenta que pode auxiliar os operadores nos centros de controle do sistema a monitorar e possivelmente prepararem-se para tomar ações preventivas no sentido de evitar um dos problemas que pode ocasionar grandes blecautes na rede elétrica.

Devido a importância econômica e estratégica que a energia elétrica desempenha em nossa sociedade, o desenvolvimento de uma nova ferramenta que possa auxiliar na operação segura e eficiente do sistema é de fundamental importância.

A proposta de ferramenta visa utilizar um banco de dados que contenha os valores das magnitudes e ângulos das tensões, bem como dos valores das margens de estabilidade de tensão para

diversos cenários de carregamento e topologia da rede para o cálculo de um modelo que estime o valor da margem tendo como entrada os valores das grandezas medidas pelas PMUs (*Phasor Measurement Units*).

Devido a sua importância, muitas concessionárias possuem esse banco de dados pronto para a realização de análises de estabilidade. Desta forma a ferramenta poderia se utilizar deste banco de dados para o cálculo dos parâmetros do modelo do estimador.

1.2 Objetivos do trabalho

A presente tese procura abordar a utilização de técnicas de identificação de sistemas e medidas obtidas de unidades de medição fasorial sincronizada para monitorar a estabilidade de tensão em regime permanente de sistemas elétricos. Para este fim propõe-se uma ferramenta que utiliza modelos de sistemas dinâmicos que relacionam as grandezas medidas fasoriais sincronizadas com o valor da margem de estabilidade de tensão.

Com a inclusão cada vez maior da tecnologia de medição fasorial sincronizada no setor elétrico, o desenvolvimento de técnicas que se utilizam da imensa massa de dados proveniente desse novo sistema de medição pode trazer grandes benefícios para a operação segura do sistema. A ferramenta proposta tem como objetivo de se tornar um instrumento adicional aos operadores dos centros de controle para o monitoramento da proximidade do ponto de operação do sistema ao colapso de tensão.

Apesar de o problema de estabilidade de tensão ser considerado de dinâmica lenta, quando comparado a outros problemas existentes na operação, muitas vezes sua ocorrência não apresenta sintomas facilmente detectáveis. Em geral o problema de estabilidade de tensão tem uma característica local que pode facilmente assumir proporções sistêmicas se não sanado a tempo.

Desta forma os estudos desta tese visam o desenvolvimento de uma ferramenta que possa tornar os sintomas do problema de estabilidade de tensão mais evidentes e proporcionar mais tempo aos operadores para tomarem medidas preventivas e evitarem o problema.

Um dos objetivos para a ferramenta é que a mesma possa ser utilizada como um auxílio à operação do sistema, permitindo a identificação prévia de indícios que denunciem que o sistema esteja em ponto de operação que ofereça um elevado risco de colapso de tensão.

Uma vez que o método é composto por um processo em duas etapas, uma etapa *off-line* com tratamento do banco de dados e cálculo de parâmetros e outra em “tempo real”(*on-line*), que aplica o modelo no conjunto de medidas e estima um valor para a margem, espera-se que todo o esforço computacional seja concentrada na etapa *off-line* sem que se perca precisão do método para que a etapa *on-line* possa se beneficiar da rapidez e precisão obtida da etapa anterior.

Além disso espera-se que os algoritmos desenvolvidos para a alocação de PMUs possam contribuir com o problema de alocação de PMUs propondo a inclusão de um critério para o monitoramento da estabilidade de tensão nos objetivos a serem atingidos ao se alocar as unidades de medição.

1.3 Estrutura da Tese

Esta tese apresenta um primeiro capítulo de introdutório que procura apresentar de maneira sucinta as motivações para os estudos realizados e os objetivos pretendidos com o estudo, bem como apresentar a estrutura em que a tese foi organizada. O segundo capítulo faz uma revisão bibliográfica a respeito do problema de estabilidade de tensão, apresentando o problema a ser abordado e mostrando alguns trabalhos na literatura a respeito do assunto de forma a contextualizar a pesquisa desenvolvida.

O terceiro capítulo faz uma breve apresentação sobre as bases teóricas da ferramenta de identificação de sistemas utilizada na tese, discutindo brevemente a estimação de parâmetros, a estrutura de modelos dinâmicos utilizados para representar alguns tipos de sistemas discretos e algumas das técnicas encontradas na literatura para o cálculo de seus parâmetros.

O quarto capítulo, apresenta os conceitos e definições da tecnologia de medição fasorial sincronizada, apresentando um breve panorama de sua utilização, em especial no Brasil, bem como algumas aplicações encontradas na literatura que se beneficiam de seu advento.

O quinto capítulo, traz uma descrição da metodologia proposta além de apresentar os resultados obtidos. O sexto capítulo contém as conclusões e discussões a respeito dos resultados obtidos no estudo.

Capítulo 2

Estabilidade de Tensão

2.1 Introdução

O estudo de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência vem sendo realizado desde o fim da década de 70 quando o problema de estabilidade de ângulo já estava bem analisado e compreendido. Na década de 80 observou-se uma diminuição dos investimentos em parques geradores e na infraestrutura do sistema de transmissão, conduzindo o sistema a operar numa condição estressada (Cutsem & Vournas, 1998). Devido à sua importância, a análise da estabilidade de tensão de sistemas de transmissão de energia vem sendo estudada por um grande número de pesquisadores nos últimos trinta anos, resultando em grandes progressos no entendimento do fenômeno.

A estabilidade de tensão abrange uma vasta gama de fenômenos que cobrem desde os mais rápidos relacionados com máquinas de indução ou links HVDC até os fenômenos mais lentos relacionados com a mudança de *taps* dos transformadores (Taylor, 1994).

Pode-se iniciar o estudo de estabilidade de tensão de um sistema definindo-se o que seria a ausência da mesma, ou seja, a instabilidade de tensão. A referência (Cutsem & Vournas, 1998) utiliza uma definição bastante interessante do que seria a instabilidade de tensão:

“A instabilidade de tensão ocorre em decorrência da tentativa da dinâmica da carga em tentar restabelecer o consumo de potência acima da capacidade do sistema de geração e transmissão combinados”.

Esta definição é bastante interessante pois, analisando-a, é possível identificar alguns aspectos

referentes a possíveis metodologias de análise, como por exemplo a análise por curvas PV. Esta relação ficará mais clara na seção 2.3.1 na qual o método é descrito em detalhes.

A referência (IEEE/CIGRE, 2004) propõe uma definição baseada em princípios mais próximos do modelo físico do sistema para o que seria a estabilidade de tensão e está reproduzida a seguir.

“A estabilidade de tensão se refere à capacidade do sistema de potência de manter valores adequados de tensão em regime permanente em todas as barras do sistema após o mesmo ser submetido a uma perturbação, considerando uma dada condição inicial de operação.”

Esta mesma referência também procura definir estabilidade do sistema de uma maneira mais genérica, classificando e descrevendo as diversas espécies de estabilidade. Esta classificação se baseia em identificar certas características do fenômeno.

Em primeiro lugar identifica-se a natureza física da instabilidade, cujo indício está na variável do sistema em que a instabilidade se apresenta de maneira mais acentuada. Desta forma (Kundur, 1994) identificou três tipos de estabilidade, a saber, estabilidade de ângulo do rotor das máquinas, estabilidade de frequência e finalmente a estabilidade de tensão.

Em segundo lugar, com relação à magnitude da perturbação considerada, que influencia no método de resolução empregado, a referência (Kundur, 1994) destaca a análise de pequenas e grandes perturbações comumente investigadas.

Por último, faz-se uma análise dos dispositivos, processos e a escala de tempo envolvida. Como resultado, a análise de estabilidade é subdividida em fenômenos de curta duração e de longa duração.

A referência (IEEE/CIGRE, 2004) faz uma descrição e classificação detalhada da estabilidade de ângulo e de frequência. Entretanto, nesta tese o interesse é a análise da estabilidade de tensão, desta forma a mesma será melhor detalhada.

A estabilidade de tensão admite diversas abordagens de estudo dependendo do aspecto em que se esteja interessado em estudar, uma vez que a abrangência em termos de rapidez com que o fenômeno pode ocorrer vai desde os transitórios rápidos de sistemas dinâmicos até faixas de tempo que podem ser consideradas como de regime permanente. Independentemente do tipo de estudo a ser considerado, uma característica inerente do problema de estabilidade de tensão que difere da estabilidade de ângulo e da estabilidade de frequência, é o fato das cargas terem um papel muito

importante, apesar de não serem as únicas, nas causas que desencadeiam o mecanismo de perda de estabilidade.

Quando o sistema opera em uma condição estressada, o mesmo pode apresentar um novo tipo de comportamento caracterizado por quedas de tensão lentas e graduais ou abruptas em regime permanente. Eventualmente, pode ocasionar um processo de restabelecimento da potência consumida pela atuação dos **OLTCs** (*On Load Tap Changing*) ao se detectar a ocorrência de sub-tensões e da atuação dos motores de indução da rede que encontram um novo ponto de operação na curva de potência versus escorregamento, de forma a suprir a mesma potência com um valor anormal de tensão.

A instabilidade de tensão, apesar de ser, na maioria das vezes, um problema com impactos localizados em regiões críticas do sistema pode, em alguns casos, levar à ocorrência de eventos em cascata, resultando em desligamentos de parte significativa de um sistema de transmissão, ou até mesmo em desligamento total. Em eventos de grande proporção, os sistemas vizinhos também podem ser atingidos através de sobrecargas nos intercâmbios ou da propagação de sub-tensões através das interligações. Por isso, para aumentar o nível de segurança, é de suma importância o monitoramento em tempo real da margem de segurança do sistema em relação à instabilidade de tensão. Além disso, despachar, quando necessário, ações preventivas para a manutenção de níveis seguros de margem, mesmo na presença de contingências.

Muitos trabalhos se concentram em estudar sobre que condições o sistema é capaz de manter sua estabilidade de tensão considerando diversos cenários, ou seja quando o sistema pode se tornar instável no que diz respeito à tensão, situação que também pode ser identificada como colapso de tensão (Canizares, 1995b). Além disso, é possível encontrar na literatura um trabalho que estuda o problema de estabilidade de tensão e que visa principalmente a identificação das margens de estabilidade das áreas críticas e ações de reforço e recuperação (Mansour et al., 1994).

2.2 Análise da Estabilidade de Tensão

Nesta seção uma breve descrição da análise da estabilidade de tensão do ponto de vista dinâmico será realizada, para em seguida se tratar do problema do ponto de vista de regime permanente, que será o foco desta tese.

O problema da estabilidade de tensão do sistema de energia elétrica pode ser considerado do ponto de vista dinâmico, cuja abordagem requer uma análise do modelo do sistema dinâmico, não linear sendo o foco do estudo a existência e classificação dos tipos de bifurcação que ocorrem nos pontos de equilíbrio do sistema (Vargas & Canizares, 2000), assim como é possível utilizar uma abordagem baseada no modelo estático do sistema (equações do fluxo de carga).

2.2.1 Teoria de Bifurcação

A teoria de bifurcação estuda as mudanças nas estruturas qualitativas e topológicas no comportamento das soluções de uma família de equações diferenciais, ao se modificar os valores dos parâmetros do sistema, podendo ocorrer tanto em sistemas contínuos como em sistemas discretos. Uma bifurcação propriamente dita ocorre quando uma pequena alteração nos valores dos parâmetros causa uma repentina mudança no comportamento do sistema (Hall et al., 2006).

Um ponto de equilíbrio ($x_0(t)$) é um ponto de bifurcação quando ocorre uma mudança no comportamento das trajetórias em decorrência de uma alteração nos valores dos parâmetros, como por exemplo, o ponto passa a ser instável, uma solução periódica pode surgir ou desaparecer, etc.

O estudo da bifurcação admite uma divisão que classifica os pontos em bifurcações locais, e globais.

Uma bifurcação local pode ser analisada pela mudança nas propriedades da estabilidade local dos pontos de equilíbrio, pelas orbitas periódicas no espaço de estados, ou outros conjuntos invariantes como os valores dos parâmetros atravessando um limiar crítico. A bifurcação local ocorre quando uma mudança no valor do parâmetro causa uma mudança no ponto de equilíbrio, que corresponde à parte real de um dos autovalores do ponto de equilíbrio passar pelo zero, no caso de sistemas contínuos.

Neste tipo de bifurcação, as mudanças no lugar geométrico formado pelas trajetórias do sistema dinâmico no plano de fase, podem ser confinadas em vizinhanças arbitrariamente menores em torno dos pontos de equilíbrio ao se modificar o valor do parâmetro de bifurcação, resultando deste fato o nome de bifurcação local.

Uma bifurcação global ocorre quando há uma colisão de uma trajetória com algum ponto de equilíbrio, como por exemplo o encontro de orbitas periódicas com pontos de sela. Este tipo de

bifurcação causa uma mudança topológica nas trajetórias no plano de fase que não podem ser confinadas em vizinhanças próximas dos pontos como no caso da bifurcação local, estendendo-se à distâncias arbitrariamente maiores, justificando o nome global.

Na referência (Arones, 2010), uma análise da utilização da teoria de bifurcação no estudo da estabilidade dinâmica de tensão é efetuada, na qual, após escolher-se o tipo de fenômeno a ser estudado e conseqüentemente o modelo a ser utilizado, utiliza-se a teoria de bifurcação para estudar o referido sistema dinâmico.

É possível expressar todas as características de comportamento do sistema dinâmico considerando diversas escalas de tempo, tipos de dispositivos, e magnitudes de perturbação importantes para a análise do problema de estabilidade (Arones, 2010).

Entretanto para facilitar as análises dos diferentes fenômenos nas diversas escalas de tempo, é interessante dividir o modelo do sistema de modo a representar as características às quais se esteja interessado em estudar.

Desta forma é comum partir-se de um modelo dinâmico geral composto por um conjunto de equações algébrico-diferenciais não lineares com variáveis contínuas e discretas para modelos mais simples dependendo do tipo de fenômeno de interesse.

Uma visão mais detalhada a respeito dos modelos utilizados e suas simplificações para os diversos estudos pode ser encontrada em (Arones, 2010). De acordo com a referência um possível modelo para o sistema dinâmico completo é o seguinte:

$$\dot{x} = f(x, y, z_c, z_d, u, \lambda), \quad (2.1a)$$

$$\dot{z}_c = h_c(x, y, z_c, z_d, u, \lambda) \quad (2.1b)$$

$$z_d(k+1) = h_d(x, y, z_c, z_d(k), u, \lambda) \quad (2.1c)$$

$$0 = g(x, y, z_c, z_d, u, \lambda) \quad (2.1d)$$

Neste conjunto de equações, em (2.1a) $x \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de variáveis de estado dinâmicas, e representa a porção do modelo correspondente à escala de tempo eletromecânica dos geradores síncronos e seus reguladores, como o regulador automático de tensão e o regulador de velocidade, dos motores de indução, das variáveis dos componentes da parte em **HVDC** (*High-Voltage Direct Current*) e dos dispositivos **FACTS** (*Flexible AC Transmission System*). Esta escala de tempo

possui valores típicos da ordem de vários segundos após a ocorrência de uma perturbação. f é um vetor de funções não lineares do modelo dinâmico.

O vetor $u \in \mathbb{R}^m$ é o vetor de entradas de controle do sistema e pode representar por exemplo a posição dos taps dos transformadores, valor das tensões especificadas nas barras com tensão controlada, etc.

Os vetores z_c e z_d em (2.1b) e (2.1c) (correspondem aos vetores de estado das respostas contínuas e discretas respectivamente das dinâmicas mais lentas como por exemplo no comportamento de cargas termostáticas, no controle secundário de tensão, no controle de carga-frequência, transformadores com tap variável **OLTC** (*On Load Tap Changing*), no chaveamento de capacitores e reatores shunt, em alguns dispositivos de proteção como limitadores de sobre-excitação e de corrente de armadura de geradores síncronos e todos os fenômenos cuja escala de tempo seja da ordem de alguns minutos após a ocorrência de alguma perturbação.

Associado a essa dinâmica em escala de tempo da ordem de minutos, temos um conjunto de funções não lineares contínuas e discretas representadas por h_c que pode corresponder por exemplo à equação de estado dos limitadores de sobre-excitação da máquina síncrona e h_d , que pode representar as equações a diferenças do modelo discreto dos **OLTCs**.

O conjunto de equações (2.1d) descreve a rede elétrica, cuja resposta pode ser considerada instantânea em relação às escalas de tempo envolvidas nos demais fenômenos representados no modelo. Nesse conjunto de equações, y é o vetor de estados do sistema que contém as magnitudes e ângulos dos fasores das tensões do sistema, e g é o vetor de funções não lineares dos fluxos de potência e as equações associadas com o modelo da máquina síncrona dos geradores.

Apesar de a análise de bifurcações ser rigorosamente um método de análise de sistemas dinâmicos, diversos trabalhos na literatura estudaram a possibilidade de se utilizar um modelo em regime permanente da rede como as equações do fluxo de potência (2.1d).

Uma vez que a análise de bifurcações se fundamenta no estudo do comportamento dos sistemas nas vizinhanças e nos pontos de equilíbrio do mesmo, é interessante ressaltar o fato de que quando estamos trabalhando com um sistema de equações não lineares algébricas, a definição de ponto de equilíbrio perde o sentido, uma vez que o fato de $f(x_*, y, u, p_*) = 0$ não implicar necessariamente que $g(x_*, y, u, p_*) = 0$, e nem o oposto, ou seja, o fato de $g(x_*, y, u, p_*) = 0$ não implicará necessariamente que $f(x_*, y, u, \lambda_*) = 0$.

A análise de bifurcações para o caso de sistemas estáticos se fundamenta na análise das soluções das equações algébricas que descrevem o modelo estático do sistema, a referência (Dobson, 1994), apresenta uma análise detalhada a respeito do tema. Nesta referência o autor demonstra que é possível se utilizar o modelo estático do sistema elétrico para a determinação da proximidade do sistema ao colapso de tensão, sem recorrer a modelos dinâmicos detalhados da carga.

Ainda de acordo com a referência (Dobson, 1994), considerando-se um sistema dinâmico $\dot{x} = f(x(t), \lambda)$, com λ sendo o parâmetro para a análise de bifurcação, caso haja uma bifurcação em (x_*, λ_*) , a mesma pode ser analisada no modelo estático, bastando para isso realizar manipulações algébricas e assim ser possível utilizar um sistema algébrico associado, como por exemplo, no modelo dinâmico completo do sistema elétrico utilizar somente as equações de fluxo de carga, para estudar a distância do ponto de operação ao colapso de tensão.

Tendo em mente o fato de que a estabilidade de tensão está fortemente relacionada ao comportamento da carga, os resultados de (Dobson, 1994), (Canizares, 1995a) e (de Souza et al., 2005) permitem concluir que para certos modelos de sistemas de potência as bifurcações que são observadas no sistema dinâmico completo (2.1) também podem ocorrer quando se considera apenas o sistema de equações do fluxo de carga (2.1d).

Além disso, a referência (Canizares, 1995b) analisou sob que condições é possível detectar os tipos de bifurcações comumente associadas ao problema de estabilidade de tensão, utilizando as equações de fluxo de carga para um sistema AC/DC, concluindo que sob certas condições os tipos de bifurcações geralmente associadas ao problema de estabilidade observadas no modelo dinâmico completo têm uma equivalência com as bifurcações do modelo estático, sendo possível a utilização de modelos estáticos para a determinação do ponto de colapso de tensão.

A tese (Arones, 2010), realiza uma análise mais detalhada a respeito do estudo de bifurcações para o estudo da estabilidade de tensão, e contém diversas referências de trabalhos que fornecem um embasamento para a utilização de modelos estáticos para a determinação da proximidade do colapso de tensão.

2.3 Análise estática da estabilidade de tensão

Na análise de estabilidade de tensão utilizando modelos estáticos, a ocorrência do colapso de tensão é comumente associada a dois tipos de bifurcações, bifurcações sela-nó e bifurcações induzidas por limites. Considerando o modelo estático do sistema, a análise de bifurcações pode ser realizada, assumindo como variável o estado do sistema, magnitudes e ângulos das tensões nas barras do sistema, e como parâmetro um coeficiente para incremento da potência especificada líquida em cada barra.

O lugar geométrico das soluções do conjunto de equações do fluxo de carga, para cada valor do parâmetro, define uma trajetória que descreve o comportamento da variável ao se variar o parâmetro. Esta trajetória se assemelha com o diagrama de bifurcação em sistemas dinâmicos, e por esta razão é possível aplicar algumas das considerações para a classificação de bifurcações analisando estas trajetórias.

A identificação do tipo de bifurcação pode ser feita pela análise dos autovalores e autovetores da matriz Jacobiana associada às equações do fluxo de carga (2.1d). A bifurcação do tipo sela-nó ocorre quando para uma dada entrada inicial u_0 , no ponto (y_*, p_*) para o qual a matriz Jacobiana possui apenas um único autovalor nulo e cujos autovetores associados sejam não nulos.

Uma outra maneira de se identificar a ocorrência da bifurcação sela-nó, é analisando as trajetórias dos estados do sistema $(|V|, \theta)$ quando estes variam em relação a um parâmetro, no caso o fator de carregamento λ . Quando duas trajetórias distintas, uma correspondente à um ponto de equilíbrio estável e a outra correspondente a um ponto de equilíbrio instável, se encontram e desaparecem ao se variar o valor do parâmetro λ , identifica-se este ponto como um ponto de bifurcação sela-nó (Arones, 2010).

A bifurcação induzida por limites em sistemas de energia elétrica ocorre quando ao se aumentar o carregamento do mesmo, os limites dos controles contidos nos modelos são atingidos, como por exemplo os limites da corrente de campo das máquinas síncronas, que podem ser representados como limites de geração de potência reativa das barras em que as máquinas estão instaladas.

As bifurcações induzidas por limites podem ocasionar na diminuição da distância entre o ponto de operação e o ponto de colapso de tensão, eventualmente até mesmo o desaparecimento dos pontos de operação, levando ao colapso de tensão. O ponto onde esta bifurcação ocorre é

definido matematicamente como o ponto (y_*, p_*) , para um dado valor de u_0 , no qual dois pontos de equilíbrio colidem e todos os autovalores da matriz Jacobiana neste ponto possuem parte real não nula, garantindo a não singularidade da matriz Jacobiana (Arones, 2010).

Nesta tese considera-se uma metodologia que utiliza o modelo estático para a determinação da proximidade do ponto de operação do sistema ao colapso de tensão, analisando-se o comportamento das trajetórias dos estados do sistema ao se variar o fator de carregamento λ , construindo-se assim um gráfico $V \times \lambda$, que pode ser analisado de uma maneira similar a um diagrama de bifurcação.

A referência (Gao et al., 1992), é um dos primeiros trabalhos em que se analisa o problema de estabilidade de tensão utilizando como ferramenta a análise modal estática dos autovalores e autovetores da matriz Jacobiana reduzida reativa. Esta abordagem analisa o problema do ponto de vista estático, obtendo excelentes resultados, de modo que esta ferramenta de análise ainda é utilizada e uma descrição mais detalhada do método será realizada na seção 2.3.4.

A referência (da Costa & da Silva, 1998) analisa a utilização de um modelo em regime permanente de motores de indução para a determinação dos limites de estabilidade de tensão considerando pequenas perturbações, concluindo que quando as cargas são representadas parcial ou totalmente pelo modelo de motor de indução, o limite de estabilidade de tensão estático, caracterizado pela singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga é atingido antes do limite de estabilidade de tensão ao se atingir o ponto de máximo carregamento do sistema.

Na literatura é possível encontrar trabalhos que procuraram analisar a estabilidade de tensão utilizando diagramas de bifurcação construídos com as equações do fluxo de carga, inclusive sob que condições seria possível utilizar o método de Newton e o desacoplado rápido para a obtenção do diagrama de bifurcação do sistema (Alves et al., 1999a;b).

Normalmente os estudos a respeito da estabilidade de tensão do sistema não são realizados em tempo real, entretanto os mesmos são capazes de fornecer uma identificação precisa dos níveis críticos de carregamento, das contingências críticas (Stefopoulos et al., 2005), áreas críticas e o máximo carregamento do sistema considerando cenários de contingência $(N - 1)$, ou seja, a saída eventual de operação de apenas um equipamento do sistema (Abed, 1999).

2.3.1 Curvas PV e Curvas QV

A análise da estabilidade de tensão considerando modelos estáticos utiliza ferramentas similares às descritas no estudo de estabilidade de tensão quando se considera modelos dinâmicos. A análise dinâmica da estabilidade de tensão faz uso de diagramas de bifurcação para determinar e classificar o tipo de bifurcação que pode ocorrer nos pontos de equilíbrio do sistema ao se variar um parâmetro, no caso da análise com modelos estáticos diagramas semelhantes são utilizados.

Considerando o sistema de equações do problema de fluxo de carga (2.1d), fixando-se $x = x^*$, $z_c = z_c^*$, $z_d = z_d^*$, $u = u^*$ e mantendo como variável apenas o vetor y que contem o estado da rede \mathbf{V}, θ , é possível explicitar as expressões dos mismatches de potência e o parâmetro λ :

$$\begin{bmatrix} \lambda(\mathbf{P}_{ger} - \mathbf{P}_{dem}(\mathbf{V})) \\ (\mathbf{Q}_{ger} - \lambda\mathbf{Q}_{dem}(\mathbf{V})) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{calc}(\mathbf{V}, \theta) \\ \mathbf{Q}_{calc}(\mathbf{V}, \theta) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.2)$$

onde P_{ger} é a potência ativa gerada nas barras, P_{dem} é a potência ativa demandada nas barras, Q_{ger} é a potência reativa injetada nas barras, Q_{dem} é a potência reativa consumida pelas barras e P_{calc} e Q_{calc} são as expressões para as potências ativas e reativas nas barras do método de fluxo de potência.

Desta forma, é possível, pela variação do parâmetro λ , construir gráficos que se assemelham aos diagramas de bifurcação utilizados para o estudo de bifurcações em sistemas dinâmicos não lineares. Uma metodologia muito utilizada para análise da estabilidade de tensão utilizando modelos estáticos e a formulação incluindo o parâmetro λ é chamada análise de curvas PV.

Nesta metodologia, constrói-se uma curva que corresponde aos valores das magnitudes das tensões nas barras, para cada valor de carregamento do sistema, obtidos por sucessivas soluções do conjunto de equações (2.2). Como a potência especificada nas barras é diretamente proporcional ao parâmetro λ , na verdade a curva PV pode ser analisada como um diagrama de bifurcação no qual pode se observar o comportamento de um estado do sistema em resposta à variação de um parâmetro (Kundur et al., 2004).

Como pode se observar pela equação (2.2), o parâmetro λ modifica tanto a potência ativa especificada como a potência reativa demandada nas barras, é possível utilizar uma curva QV para realizar uma análise da estabilidade de tensão de uma maneira semelhante a curva PV. Ambos os

métodos são utilizados para se determinar a distância do ponto de operação ao ponto de colapso de tensão.

Apesar das semelhanças, o método de curva QV analisa o problema do ponto de vista da quantidade de potência reativa necessária para que uma barra do sistema apresente problemas de estabilidade de tensão. Esta curva é construída simulando-se a inserção de um gerador síncrono na barra que será analisada para controlar a tensão da mesma, então varia-se a tensão especificada da barra e um problema de fluxo de carga é solucionado. Desta forma a curva é composta pelos valores de potência reativa que o gerador necessitou injetar na barra para que a tensão na barra se mantivesse no valor especificado para cada valor de tensão especificada.

A referência (Taylor, 1994) lista as diversas vantagens do método de curva QV, entretanto o fato de o método realizar a análise em uma barra de cada vez, torna-o inadequado para análises abrangentes em sistemas de grande porte, sendo mais adequado para casos em que se esteja interessado em analisar algum equipamento específico da rede.

Uma interessante interpretação a respeito da análise da curva QV para a determinação da distância do ponto de operação para o colapso de tensão utilizando o conceito de energia, obtida da área sob a QV pode ser vista em (Overbye et al., 1994).

Analisando-se os possíveis valores de potência ativa, reativa e magnitude de tensão que as soluções do problema (2.1d) pode possuir, é possível obter uma região no espaço das variáveis PQV que contenha todos os valores de P, Q e V para os quais o sistema de equações (2.1d) apresente uma solução.

Além disso, é possível definir uma fronteira de estabilidade que divide a região em soluções cuja estabilidade de tensão seja garantida e em uma sub-região cujos pontos correspondem a soluções do problema que não garantem a estabilidade de tensão.

Na tese (Arones, 2010) encontra-se uma análise para sistemas de pequeno porte do formato da região e da fronteira de estabilidade, bem como sua relação com os pontos de bifurcação sela-nó e de bifurcação induzidas por limites. Com base nos resultados da tese e da teoria encontrada na literatura (Ajjarapu, 2006, IEEE Power System Relaying Committee, Substation Protection Subcommittee, 1996) é possível concluir que a parte da região correspondente à parte estável é formada pelas trajetórias das variáveis de estado do sistema, quando se varia o parâmetro λ até que se chegue na fronteira de estabilidade, sendo que os valores assumidos pelos estados do sistema

estão dentro de uma faixa considerada segura para a operação.

2.3.2 Método de fluxo de carga da continuação

Nas proximidades do ponto de colapso de tensão a matriz Jacobiana do conjunto de equações (2.1d) se torna singular, desta forma os métodos numéricos convencionais de solução do conjunto de equações que utilizam a informação da Jacobiana ficam suscetíveis a apresentar problemas de convergência nas proximidades do ponto de colapso.

O método de fluxo de carga da continuação permite contornar este problema, reformulando o conjunto de equações (2.1d) de forma que o mesmo seja bem condicionado para todas as possíveis condições de carregamento. Com este método é possível obter as soluções do problema de fluxo de carga para os pontos de equilíbrio estáveis, representados pela parte superior da curva PV, como para os pontos de equilíbrio instáveis, representados pela parte inferior da curva PV. O conjunto de equações modificado está apresentado em (2.3)

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{P}_{ger0}(1 + \lambda^C \kappa_{ger0}) - \mathbf{P}_{dem0} + \lambda^C (P_{dem}(\mathbf{V}))) \\ (\mathbf{Q}_{ger0} - \mathbf{Q}_{dem0} + \lambda^C (Q_{dem}(\mathbf{V}))) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{calc}(\mathbf{V}, \theta) \\ \mathbf{Q}_{calc}(\mathbf{V}, \theta) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.3)$$

No método de fluxo de carga da continuação, utiliza-se um esquema preditor-corretor para encontrar uma trajetória de pontos de equilíbrio para o sistema de equações não lineares (Ajjarapu & Christy, 1992). No esquema preditor-corretor o conjunto de equações do fluxo de carga são alterados de forma a contemplar o fator de carregamento λ^C como uma variável e não como um parâmetro.

Passo Preditor

No passo preditor, parte-se de uma solução conhecida do problema, como por exemplo o caso base $V^0, \theta^0, \lambda^C = 0$, em seguida incorpora-se o parâmetro λ^C como variável, fixando uma outra variável do problema original em ± 1 de modo a se obter um sistema com número de equações adequada ao número de variáveis, para então calcular uma predição tangencial no ponto conhecido. A escolha da variável que vai ser fixada no passo preditor é chamada de parametrização local (Ajjarapu & Christy, 1992), outros esquemas de parametrização podem ser utilizados, como por exemplos das referências (Alves et al., 2000a;c;b).

Com o valor da predição tangencial calculado, atualiza-se as variáveis na direção da tangente calculada.

Passo Corretor

Após o término do passo preditor, temos uma solução aproximada que deve ser corrigida, pela solução do novo conjunto de equações do fluxo de carga que sofreu uma ligeira modificação devido à parametrização utilizada no passo preditor, no caso de se utilizar parametrização local, a alteração será a adição de uma equação a mais correspondente à variável parametrizada, e o aumento de uma variável a mais ao problema.

É possível encontrar na literatura outras aplicações para o método de fluxo de carga da continuação, como por exemplo (Wang et al., 2001) que utiliza o método para analisar e classificar sistemas como bem-condicionados, mal-condicionados e sem solução, possibilitando uma clara distinção criteriosa a respeito da solvabilidade de métodos de solução de problemas de fluxo de carga.

Na referência (Alves et al., 2003) os autores apresentam modificações no método que possibilitam a utilização do método desacoplado rápido em conjunto com o método da continuação, com os benefícios de ambos. Testes foram realizados alterando o algoritmo do passo preditor utilizando um preditor do tipo secante e não tangente além da utilização da reserva de reativos em barras PV como parâmetro, concluindo que o método de Newton-Raphson completo deve ser utilizado com o método da continuação, pois os benefícios de se utilizar o método desacoplado rápido foram mínimos.

A Figura 2.1 ilustra os passos preditor e corretor do método da continuação, ao se construir uma curva PV, encontrando a trajetória dos pontos de equilíbrio, sendo capaz de construir tanto a parte superior da curva em relação ao ponto crítico como a parte inferior.

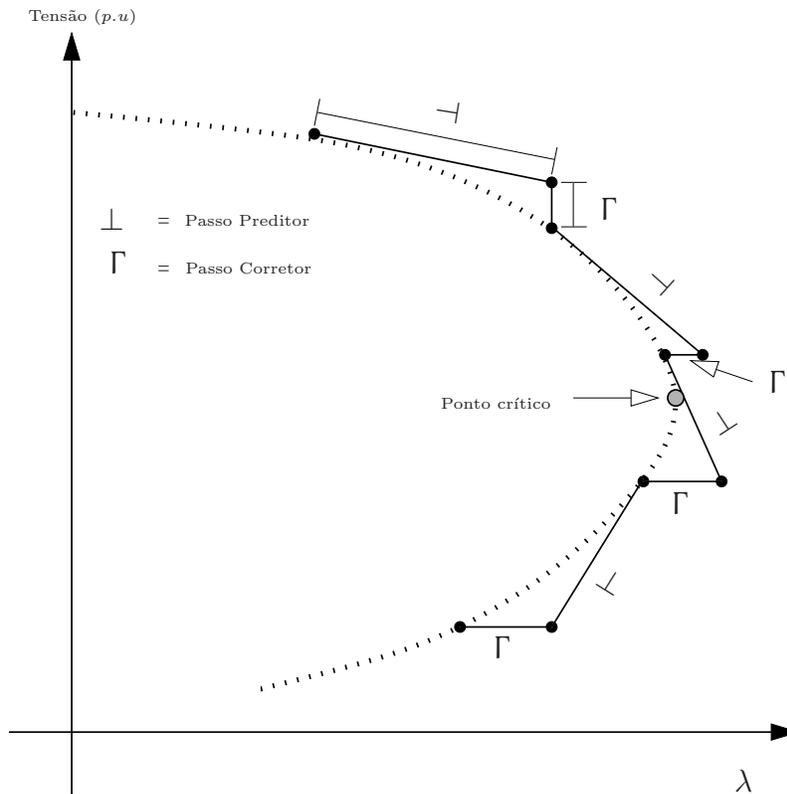


Figura 2.1: Método de fluxo de carga da continuação

2.3.3 Margem de estabilidade de tensão (MET)

Na análise de estabilidade de tensão utilizando tanto curvas PV quanto curvas QV, é possível obter informações a respeito da distância do ponto de operação ao ponto de colapso de tensão em termos do carregamento do sistema, ou da reserva de reativos dos geradores instalados.

Esta informação pode ser obtida definindo-se a chamada de margem de estabilidade de tensão (**MET**), que é a máxima variação do parâmetro associado a cada curva que o sistema pode sofrer antes que o mesmo perca a estabilidade de tensão.

No caso do método da curva QV, a **MET** é medida em termos da reserva de reativos que as máquinas do sistema possuem. Apesar de a curva ser construída variando-se a tensão especificada da barra sob teste, o importante neste caso é atingir o ponto onde o comportamento esperado para o controle de tensão da barra se inverte, ou seja, o ponto no qual a injeção de reativos pelo gerador ao sistema provoca uma diminuição na magnitude da tensão da barra controlada.

No caso da curva PV, a **MET** pode ser medida tanto em termos da potência ativa demandada pelo sistema em MW como em termos do valor do fator de carregamento λ que em geral é uma porcentagem da potência nominal do sistema.

Uma característica importante a ser ressaltada na metodologia de curva PV é o fato de que utilizar o fator de carregamento λ , permitir sistematizar o processo de construção da curva independente do tamanho do sistema, uma vez que λ pode alterar simultaneamente o carregamento de todo o sistema, permitindo a obtenção do valor da **MET** para todo o sistema para um dado ponto de operação com a construção de apenas uma curva.

A Figura 2.2 apresenta um exemplo de uma curva PV do sistema em que no eixo das abscissas temos os valores do fator de carregamento λ , interpretado como um escalar e no eixo das ordenadas os valores da tensão da barra que possui o menor valor de margem. Na figura é possível notar que o valor da margem depende também do ponto de operação escolhido. Na figura, para o ponto de operação com tensão V_1 , temos um valor de margem indicada por MET_1 , e para o ponto de operação com tensão V_2 temos um valor de margem menor indicada por MET_2 . O valor de tensão V_3 corresponde ao valor de tensão em que ocorre o colapso de tensão.

A Figura 2.3 apresenta um exemplo de curvas QV de algumas barras do sistema. No caso de curvas QV, no eixo das abscissas temos os valores das tensões especificadas nas barras em que cada curva foi obtida e no eixo das ordenadas as respectivas potências reativas necessárias para se manter o valor da tensão especificada. De maneira semelhante ao que ocorre na curva PV, a margem é definida como a distância dos pontos de operação do caso base ao ponto de colapso, cuja tensão está indicada pelos valores Vn_{esp}^* , a mesma pode ser vista no gráfico identificada por Mn_{re} . Os pontos de operação no caso base coincidem com o eixo das tensões especificadas, uma vez que neste caso o condensador síncrono fictício instalado na barra em análise não está gerando nem consumindo potência reativa.

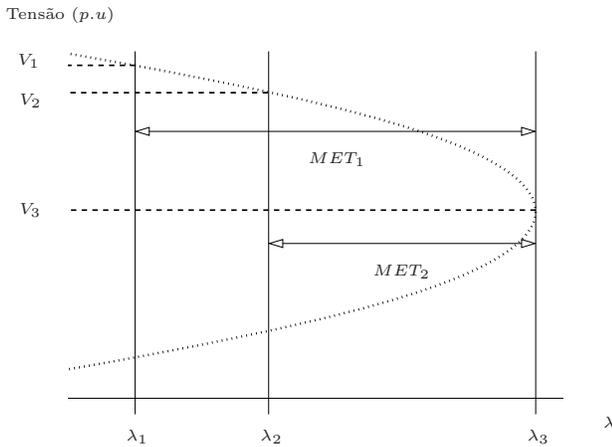


Figura 2.2: Exemplo de uma curva PV

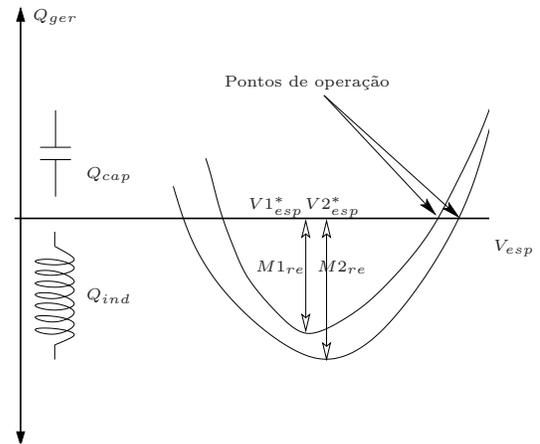


Figura 2.3: Exemplo de curvas QV

Nesta tese o valor da **MET** foi obtido por curvas PV, construídas por soluções sucessivas do conjunto de equações do fluxo de carga pelo método de Newton Raphson. O método da continuação, apesar de ser um método bastante consagrado na literatura, não foi utilizado pois o objetivo do estudo era utilizar os valores das margens calculadas para compor um banco de dados para o estimador. Desta forma, não era de interesse a obtenção de toda a curva PV, pois para o processo de obtenção do estimador seria necessário apenas o valor numérico da margem independente do formato que as curvas PV poderiam apresentar. Além disso o fator de carregamento λ foi considerado como um escalar, visto que esta condição representa um cenário mais pessimista para o sistema.

Utilizando o valor do parâmetro λ é possível avaliar qual a condição em que o sistema se encontra no que diz respeito à manutenção da estabilidade de tensão. No caso da curva QV, além do fato de se ter uma informação de natureza diferente, uma vez que o que temos é a informação da reserva de reativos, ter-se-ia que analisar diversos valores das reservas de reativos das barras que representam os geradores mais importantes e não um único valor de um parâmetro.

O valor absoluto da margem por si só fornece informações a respeito da proximidade do ponto de operação do sistema ao colapso de tensão, entretanto para que se possa avaliar de forma qualitativa um certo ponto de operação em relação à manutenção da estabilidade de tensão, muitos órgãos e operadores de sistemas desenvolveram critérios para classificá-los.

Um dos critérios bastante utilizado é o desenvolvido pela *Western Electricity Coordinating Council* (WECC) (Reactive Reserve Working Group (RRWG) , 2006) que é um órgão regional

responsável por coordenar e promover a confiabilidade dos sistemas elétricos interconectados da costa oeste dos Estados Unidos.

Este critério estabelece um valor mínimo de margem de estabilidade de tensão de 5% para sistemas sem contingências e considerando contingências simples, para os casos de contingências múltiplas, o critério estabelece uma margem de 2,5%.

No Brasil, o operador nacional do sistema (ONS), através dos procedimentos de rede (ONS - Operador Nacional do Sistema, 2011), estabelece valores mínimos para a margem denominada de margem de segurança de tensão de 7% para a rede completa e de 4% para a rede incompleta.

Como nesta tese um dos objetivos foi avaliar a eficácia da ferramenta desenvolvida para casos de contingências simples ($N - 1$), optou-se em utilizar o critério sugerido pelo (WECC), pelo fato do valor mínimo de margem estipulado ser mais conservador em relação ao sugerido pelo ONS para o caso sem contingência, e pelo fato de o valor de 5% ser muito próximo do valor adotado pelo ONS para os casos com contingência.

2.3.4 Análise Modal Estática

Como já discutido na introdução deste capítulo, a análise modal estática foi um dos primeiros métodos de análise em regime permanente do problema de instabilidade de tensão (Gao et al., 1992), e se baseia na análise dos autovalores ou modos próprios da matriz Jacobiana reduzida reativa do método de Fluxo de carga de Newton-Raphson.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_P(V,\theta)}{\partial \theta} & \frac{\partial g_P(V,\theta)}{\partial V} \\ \frac{\partial g_Q(V,\theta)}{\partial \theta} & \frac{\partial g_Q(V,\theta)}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P,\theta} & J_{P,V} \\ J_{Q,\theta} & J_{Q,V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Considerando $\Delta P = 0$ e manipulando (2.4) de forma a obter $\Delta Q = J_R^Q \Delta V$ é possível obter a expressão para a Jacobiana reduzida reativa J_R^Q :

$$J_R^Q = J_{Q,V} - J_{Q,\theta} J_{P,\theta}^{-1} J_{P,V} \quad (2.5)$$

A matriz J_R^Q contém as sensibilidades das potências reativas em relação às magnitudes das tensões nas barras do tipo PQ. Os elementos de sua diagonal representam a sensibilidade que a

potência reativa injetada em uma barra tem em relação à magnitude da tensão na mesma barra, enquanto os elementos fora da diagonal representam as influências nas magnitudes das tensões das demais barras à variação de potência reativa de uma outra barra.

Além disso, ao se analisar o comportamento da matriz J_R^Q ao se construir a curva PV, a mesma se torna singular no ponto em que acontece a instabilidade de tensão (da Silva et al., 2002). A análise modal estática, procura estudar os autovalores e autovetores de J_R^Q nas proximidades do ponto de colapso de tensão de forma a obter informações a respeito das barras mais sensíveis a variações da magnitude de tensão quando há alteração da potência reativa da mesma.

Para se realizar a análise, faz-se a decomposição em autovalores e autovetores obtendo as matrizes de autovalores e os autovetores associados. Cada autovalor é chamado de modo do sistema e para cada modo do sistema existe um conjunto de autovetores associado.

Após a decomposição da matriz ela pode ser expressa por (Kundur, 1994):

$$J_R^Q = \Xi \Lambda \Psi \quad (2.6)$$

onde Ξ é a matriz dos autovetores diretos, Λ é a matriz dos autovalores e Ψ é a matriz dos autovetores esquerdos.

Desta maneira, em (2.6) a matriz de autovalores $\Lambda \in \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}^n$ é uma matriz diagonal cujos elementos de sua diagonal $\lambda_i \in \mathbb{C}$ são os autovalores da decomposição da matriz J_R^Q e a cada autovalor α_i tem-se associado um autovetor direito $\xi_i \in \mathbb{R}^n \times 1$ que compõe a matriz Ξ e um autovetor esquerdo $\psi_i \in 1 \times \mathbb{R}^n$ que compõe a matriz Ψ .

$$\Xi = \begin{bmatrix} | & & | & & | \\ \xi_1 & \cdots & \xi_i & \cdots & \xi_n \\ | & & | & & | \end{bmatrix} \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_n \end{bmatrix} \quad \Psi = \begin{bmatrix} \text{--} & \psi_1 & \text{--} \\ & \vdots & \\ \text{--} & \psi_i & \text{--} \\ & \vdots & \\ \text{--} & \psi_n & \text{--} \end{bmatrix}$$

Da expressão (2.6) é possível escrever $\Delta Q = \Xi \Lambda \Psi \Delta V$ e utilizando algumas propriedades dessas matrizes é possível obter $(J_R^Q)^{-1}$:

$$(J_R^Q)^{-1} = \Xi \Lambda^{-1} \Psi \Rightarrow \Delta V = \Xi \Lambda^{-1} \Psi \Delta Q \quad (2.7)$$

Esta expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \frac{\xi_i \psi_i}{\alpha_i} \Delta Q \quad (2.8)$$

Analisando a expressão (2.8) é possível notar que a sensibilidade dos desvios das magnitudes de tensão das barras ΔV com relação aos desvios de potência reativa ΔQ são inversamente proporcionais aos modos da matriz $(J_R^Q)^{-1}$. Além disso, a sensibilidade recebe uma contribuição de todos os modos, sendo que os modos que mais contribuem para o valor da sensibilidade são os que possuem magnitudes mais próximas de zero.

Utilizando a propriedade $\Xi^{-1} = \Psi$, é possível reescrever a equação (2.7) de forma a obter uma expressão que relaciona o vetor de variações de tensão modal com o vetor de variações de potências reativas modal:

$$\Psi \Delta V = \Lambda^{-1} \Psi \Delta Q \quad \Rightarrow \quad \mathbf{v} = \Lambda^{-1} \mathbf{q} \quad (2.9)$$

No qual $\mathbf{v} = \Psi \Delta V$ é o vetor de variações de tensão modal e $\mathbf{q} = \Psi \Delta Q$ é o vetor de variações de potências reativas modal.

Analisando a expressão (2.9) pode se observar que a sensibilidade entre as variações das tensões modais em relação às variações das potências reativas modais é inversamente proporcional à magnitude dos autovalores da matriz $(J_R^Q)^{-1}$, uma vez que Λ^{-1} é uma matriz diagonal. Além disso, é possível concluir que enquanto o valor da magnitude dos autovalores α_i forem positivos, uma variação positiva na potência reativa modal acarretará em uma variação positiva na tensão modal, indicando que o sistema continua estável em termos de tensão.

Os modos cujas magnitudes estão mais próximas de zero são chamados de modos críticos, e quando a magnitude de algum modo atinge o valor zero, a tensão modal colapsa pois uma pequena variação finita na potência reativa provoca uma mudança infinita na tensão modal.

Pode-se particularizar a análise para cada barra, pode se considerar na expressão (2.8) o vetor $\Delta Q = e_k$, no qual o vetor elementar e_k possui elementos nulos em todas as posições exceto na posição k que é igual a 1. Desta forma o vetor ΔQ vai representar uma variação de potência reativa apenas na barra k , utilizando na expressão (2.8) obtêm-se:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \frac{\xi_i \psi_{i,k}}{\alpha_i} \quad (2.10)$$

A expressão (2.10) apresenta a sensibilidade da tensão de todas as barras em relação a uma variação na potência reativa de uma das barras, um procedimento semelhante pode ser utilizado para se obter a sensibilidade da tensão em uma barra k em relação à variação de potência reativa na mesma barra, obtendo-se:

$$\frac{\Delta V_k}{\Delta Q_k} = \sum_{i=1}^n \frac{\xi_{k,i} \psi_{i,k}}{\alpha_i} \quad (2.11)$$

É possível observar pela expressão (2.11) que a sensibilidade não é capaz de fornecer informações a respeito de cada modo que participa do colapso de tensão, mas sim do efeito combinado de todos os modos.

Dependendo das características da matriz $(J_R^Q)^{-1}$ quanto à sua simetria, os autovalores e autovetores terão características distintas. Por exemplo, se a matriz $(J_R^Q)^{-1}$ for simétrica, então tanto os autovalores como os autovetores serão reais, além disso, os autovetores direito e esquerdo serão iguais.

As magnitudes dos modos da matriz J_R^Q fornecem indicativos a respeito da distância do ponto de operação ao ponto de colapso de tensão, entretanto quando é necessário saber a distância do colapso em termos de aumento de demanda que o sistema ainda pode suportar, a informação mais precisa é dada pela **MET**.

A análise modal é utilizada para se inferir qualitativamente a respeito da estabilidade de tensão de um dado ponto de operação, ou mesmo de fornecer informações nas proximidades do colapso de tensão a respeito das áreas críticas do sistema (Bedoya et al., 2008) e sobre qual equipamento está contribuindo mais para o fenômeno.

Para a análise das áreas críticas e identificação dos equipamentos que mais contribuem no modo crítico dado um ponto de operação, utiliza-se o fator de participação da barra, que pode ser obtido da expressão (2.11):

$$FPR_k^i = \xi_{k,i} \psi_{i,k} \quad (2.12)$$

O fator de participação da barra FPR_k^i representa a contribuição do modo i na sensibilidade V-Q da barra k , seu tamanho é um indicativo da eficácia das ações corretivas caso fossem aplicadas na barra em análise.

A equação (2.12) descreve mais especificamente a expressão do fator de participação reativo associado à sensibilidade V-Q, das barras PQ. Os trabalhos (da Silva et al., 2000) e (da Silva

et al., 2002) apresentam uma generalização desse conceito introduzindo o fator de participação ativo FPA_k^i , que representa a contribuição do modo i na sensibilidade θ -P da barra k .

O fator de participação ativo pode ser obtido adotando um procedimento similar ao adotado para a obtenção da matriz J_R^Q , entretanto considerando agora que $\Delta Q = 0$, obtendo:

$$J_R^P = J_{P,\theta} - J_{P,V} J_{Q,V}^{-1} J_{Q,\theta} \quad (2.13)$$

Os artigos (da Silva et al., 2000) e (da Silva et al., 2002) realizaram uma análise aprofundada a respeito do fator de participação chegando à varias conclusões, sendo que algumas das mais importantes estão listadas a seguir:

- As matrizes J_R^Q e J_R^P são singulares no mesmo ponto;
- Explicitou a influência da potência ativa no colapso de tensão;
- As informações das duas abordagens, ativa e reativa, são complementares;
- O FPA permite a análise de barras PV e PQ, possibilitando a determinação do fator de participação ativo de geradores;

O método de análise modal e a utilização de fatores de participação foram empregados em diversos estudos que envolviam o problema de estabilidade de tensão, como por exemplo no gerenciamento do congestionamento dos sistemas de transmissão (Kopcak et al., 2003), no despacho ótimo de geradores e esquemas de corte de carga mínimo utilizando a margem de estabilidade de tensão como critério (Affonso et al., 2003). No trabalho (Omidi et al., 2009) os autores utilizam os fatores de participação ativo e reativo como restrição para o problema de despacho de geradores, utilizando também capacitores shunt para aumento de suporte de reativos.

Uma das desvantagens do método de análise modal, é o fato de ele se basear num modelo linearizado do sistema, os resultados provenientes de sua utilização são validos em uma vizinhança próxima do ponto de operação em que as matrizes J_R^P e J_R^Q foram obtidas, desta forma caso os modos do sistema sejam calculados num ponto de operação distante do ponto de colapso, as conclusões obtidas utilizando estes modos podem não ser confiáveis para a análise dos modos envolvidos no colapso de tensão.

Tendo em vista esta característica do método, o mesmo é utilizado para a obtenção de dados mais precisos, para cada ponto de operação, desta forma, uma prática comum, é associar a construção de curvas PV, QV e nos pontos próximos do ponto de colapso realizar a análise modal da matriz obtida com um carregamento próximo do máximo admissível antes que haja um colapso de tensão.

Como as matrizes J_R^P e J_R^Q são funções de vários fatores que caracterizam o sistema, como por exemplo o carregamento, a topologia, os modelos de equipamentos considerados, para que se possa ter uma visão mais precisa sobre o comportamento dos modos do ponto de vista da estabilidade de tensão, é necessário que diversas matrizes sejam obtidas, uma para cada ponto da curva PV ou QV.

Em (Kundur, 1994) ressalta-se o esforço computacional ao se lidar com sistemas de grande porte. O elevado número de barras torna o processo de decomposição para encontrar os autovalores e autovetores bastante custoso. No entanto é citado também uma alternativa que consiste em encontrar somente os 5 ou 10 autovalores mais críticos, ou seja os com menor magnitude, e seus autovetores associados.

Desta forma é possível reduzir o esforço computacional e permitir um acompanhamento dos modos do sistema durante a construção da curva PV, inclusive nas proximidades do ponto de colapso.

2.4 Análise de Sensibilidade e Índices

Além da análise de estabilidade de tensão utilizando as técnicas apresentadas neste capítulo, é possível encontrar na literatura trabalhos que procuram estudar o problema de estabilidade de tensão utilizando matrizes de sensibilidade e também utilizando índices para o monitoramento da estabilidade ou mesmo da margem de estabilidade de tensão.

Os métodos que se baseiam em análises de sensibilidade exploram o fato de que a Jacobiana reduzida reativa J_R^Q , possui informação a respeito da sensibilidade entre ΔQ e ΔV , ou mesmo utilizando a matriz diagonal de autovalores Λ da decomposição de J_R^Q que representa as sensibilidades entre as tensões e potências reativas modais.

Uma outra forma de se analisar o problema da estabilidade de tensão em regime permanente,

utilizando informações contidas na matriz Jacobiana, é realizar a decomposição em valores singulares da matriz Jacobiana. Um dos primeiros trabalhos a explorar esse princípio pode ser encontrado em (Shein & Etzion, 1995), em que após a decomposição em valores singulares da matriz Jacobiana, em que se procura monitorar o colapso de tensão pela proximidade do menor valor singular ao zero, pois esta proximidade indicaria a proximidade da singularidade da matriz Jacobiana. A única desvantagem que os autores ressaltam é o fato de que o método ser bem adaptado para matrizes perto da singularidade, como a montagem da matriz requer a solução de um sistema de equações não linear, nas proximidades o mesmo se torna muito difícil de solucionar.

A referência (de Souza et al., 1997) apresenta uma interessante análise de métodos baseados em particionamento da rede e de índices de estabilidade de tensão que aceleram o cálculo dos pontos de colapso utilizando técnicas baseadas no método da continuação identificando aplicações e possíveis áreas de aplicação, considerando o modelo dinâmico não linear do sistema. Além disso o trabalho propõe uma técnica mista de partição e redução para reduzir o esforço computacional, um método baseado em vetores tangentes para a identificação de áreas críticas no ponto de colapso e um índice de estabilidade de tensão baseado no método proposto.

Na referência (Long & Ajjarapu, 1999), a análise da estabilidade utilizando sensibilidades também foi utilizada, neste caso os autores consideraram um modelo mais completo do sistema, incluindo a parte dinâmica. Com o método desenvolvido, foi possível estimar a proximidade do ponto de bifurcação utilizando matrizes de sensibilidade do sistema dinâmico completo. Além disso o método possibilitou a estimação da alteração da margem de estabilidade em decorrência da variação do parâmetro de carregamento λ .

Uma das primeiras referências a propor um índice para análise da estabilidade de tensão na literatura foi (Kessel & Glavitsch, 1986), que definiu um índice baseado no valor do fasor de tensão de uma barra a ser estudada \vec{V}_j em relação ao valor do fasor de tensão de um equivalente do sistema considerando o modelo de uma linha de transmissão com admitâncias entre o equivalente e a barra a ser analisada.

O índice definido para cada barra j do sistema foi denominado L_j , cuja expressão pode ser vista a seguir:

$$L_j = \left| 1 + \frac{\vec{V}_{0j}}{\vec{V}_j} \right|$$

O critério de estabilidade definido no mesmo artigo estabelece que o valor de índice $L =$

$\max_{j \in \alpha_L}(L_j)$, em que α_L é o conjunto de todas as barras de carga, deve ser menor que 1 para que o sistema seja estável, e que à medida que o sistema se aproxima do ponto de colapso, o artigo mostra que o índice L se aproxima de 1.

O índice L apresenta algumas dificuldades, como por exemplo o fato de ser necessário a utilização de equivalentes para a aplicação do método. Além disso, o método requer um algoritmo para estimar a os valores das tensões no caso de se simular mudanças topológicas da rede.

No que diz respeito à utilização de equivalentes para a análise da estabilidade de tensão, a referência (Soliman et al., 2003) apresenta uma abordagem que utiliza um algoritmo de mínimo erro quadrático recursivo para o cálculo dos parâmetros de um equivalente de Thévenin do sistema nas proximidades da barra de interesse para acompanhar a mudança dos valores do equivalente à medida que a carga do sistema varia.

Na referência (Nakawiro & Erlich, 2008) diversos indicadores baseados em índices, sensibilidades e utilização de equivalentes para o monitoramento da estabilidade de tensão são implementados utilizando redes neurais adaptativas (**ANN** *Adaptative Neural Networks*). Além do índice L e da análise de sensibilidade por mínimo valor singular, o artigo também utilizou um índice de proximidade de colapso de tensão (**VCPI** *Voltage Collpase Proximity Index*), um índice de estabilidade para máxima transferência de potência (**PTSI** *Power transfer Stability Index*) e um índice de monitoramento da margem de estabilidade de tensão baseado em potência (**PVSM** *Power based Voltage Stability Margin*). Além disso, para a utilização do (**PTSI**) e do (**PVSM**), os autores implementaram um algoritmo para o cálculo de equivalentes de Thévenin.

Os índices utilizados para o monitoramento da estabilidade de tensão também podem ser utilizados para outras finalidades, como pode ser visto em (Phadke et al., 2008), em que os índices foram utilizados para a alocação e dimensionamento de controladores FACTS do tipo *shunt* de forma a obter melhorias no perfil de tensão e aumento da margem de estabilidade de tensão.

Em trabalhos mais recentes, os autores do artigo (Wang et al., 2009) desenvolveram um índice para monitorar o colapso da tensão num nó equivalente. Para isso, foi desenvolvido uma metodologia para o cálculo de um equivalente que leva em consideração os efeitos da rede local bem como da rede externa na tensão nodal equivalente obtida.

Capítulo 3

Identificação de Sistemas Dinâmicos

3.1 Introdução

No estudo de sistemas dinâmicos é de suma importância a obtenção de um modelo matemático que possa descrever e em alguns casos prever seu comportamento considerando diversos cenários e situações. A área de identificação de sistemas é uma vasta área de pesquisas que procura construir, a partir de dados de observação de entrada e saída, um modelo matemático para o sistema em estudo (Ljung, 2008). Por ser uma área de pesquisa muito ampla, possui uma infinidade de técnicas que dependem do modelo adotado para representar o sistema. Na literatura é possível encontrar diversos artigos que são tutoriais do tema e dão uma visão geral a respeito (Ljung & Gunnarsson, 1990, Vladimír, 1981, Young, 2011).

Em (Ljung, 2008) o autor procura descrever um panorama geral do campo de pesquisa da área de identificação de sistemas. No referido trabalho o autor discute as diversas possíveis aplicações da teoria de identificação de sistemas em vários campos da engenharia, além de argumentar a respeito da imensa variedade de tópicos relacionados ao tema. Devido à grande variedade de tópicos é comum se dividir em diferentes tipos de técnicas empregadas que dependem do modelo que se deseja estimar, cujo detalhamento será efetuado nas seções deste capítulo. O autor também argumenta que, apesar da diversidade de técnicas e abordagens, pode-se identificar alguns princípios básicos seguidos pela maioria das técnicas.

Devido ao tamanho e diversidade de técnicas direta e indiretamente envolvidas no tema de identificação, o próprio autor comenta em seu trabalho que “um tutorial completo em poucas

páginas não é possível”. Em vista desses fatos, neste capítulo uma breve introdução dos conceitos básicos e de algumas das técnicas utilizadas serão apresentadas.

Os métodos de identificação de sistemas vêm sendo utilizados nas mais diversas áreas do conhecimento e sua teoria apresenta um desenvolvimento bem sólido e consistente com muitos avanços.

No campo da medicina podemos citar alguns dos diversos trabalhos que utilizam técnicas de identificação de sistemas, como por exemplo, a referência (Perrott, 1992), na qual os autores utilizam métodos de identificação de sistemas para modelar a influência das mudanças da respiração e da pressão arterial na taxa de batimentos cardíacos. Em (Liberati et al., 1992), partindo-se dos registros de eletroencefalograma, um modelo foi estimado para estimar os potenciais elétricos medidos do sistema nervoso após a aplicação de um estímulo, denominado potencial evocado sensorial, (SEP) do inglês *Somatosensory Evoked Potential*.

Na referência (Herpe et al., 2006) os autores estimam o nível de glicose de pacientes em estado crítico utilizando um modelo que descreve como o nível de glicose no sangue se comporta à admissão de insulina.

Em (Semmaoui et al., 2008), métodos de identificação de sistemas foram utilizados para calibração e melhoria da imagem de tomógrafos de emissão de pósitrons (PET), *Positron Emission Tomography*.

No campo da engenharia existem diversos usos para os métodos de identificação, como por exemplo, a referência (Hashimoto et al., 2001), na qual os autores fizeram o controle e a supressão de vibrações em sistemas ressonantes. Na referência (Chong et al., 2001), os autores utilizam técnicas envolvendo redes neurais para calcular um modelo de predição da composição da emissão de gases de efeito estufa em caldeiras de vapor utilizando sistema de esteiras para alimentação de carvão.

Na referência (Peng et al., 2002) os autores utilizam modelos não lineares estimados para controlar usinas termoeletricas considerando uma dinâmica não linear com a carga. Em (Wu et al., 2004) métodos de identificação foram utilizadas para se estimar um modelo de controle para a orientação de uma aeronave, utilizando os registros de vôo de uma aeronave em escala.

Em (Jurado & Cano, 2004) técnicas de estimação de modelos foram utilizados para se estimar modelos para análise de micro turbinas em alimentadores da rede de distribuição de energia elétrica.

Técnicas de identificação de sistemas são utilizadas para o controle de voo de um dirigível robótico autônomo em (Faria, 2005).

Em (Espinoza et al., 2007) os autores utilizam métodos de identificação de sistemas não lineares para fazer a previsão de curto prazo da carga do sistema de energia elétrica, tendo como base de dados os registros temporais de longo prazo do operador do sistema de transmissão belga.

Um outro exemplo de utilização de métodos de identificação pode ser visto em (da Silva et al., 2009), quando analisou-se uma solda eletrolítica operando em regime permanente, tendo como parâmetro de entrada a corrente de saída e a tensão entre os eletrodos. No artigo (Parra et al., 2010), os autores estimaram um modelo não linear para cálculos estatísticos em rede de dados do tipo (*TCP/IP*) do RTT (*Round Trip Time*), que é o tempo para enviar um pacote de requisição de eco e recebê-lo de volta.

Ao se analisar o sistema físico a ser estimado, em alguns casos é possível obter o modelo que descreve o sistema, pois há um conhecimento prévio a respeito do mesmo ou seu modelo físico é de fácil obtenção. Estes sistemas são estudados por um modelo do tipo “caixa branca” (Candy, 2006).

Em certos sistemas apenas algumas informações a respeito do modelo físico estão disponíveis, restando a obtenção de alguns dos parâmetros pela observação dos dados obtidos da simulação do sistema, estes sistemas podem ser analisados utilizando um modelo do tipo “caixa cinza” para descrevê-los, permitindo ainda uma subdivisão nesta classe de modelos.

A primeira subdivisão trata dos modelos “caixa cinza” com modelagem física, que diz respeito aos sistemas cuja estrutura do modelo pode ser obtida com base na descrição física do modelo, mas que ainda possuem alguns parâmetros a serem determinados com base nos dados da simulação, como por exemplo o modelo em espaço de estados de uma dada ordem e estrutura (Sjöberg et al., 1995).

Uma segunda subdivisão de modelos trata de sistemas em que não se possui informações físicas a respeito da estrutura do modelo de forma a obtê-lo, mas as informações existentes permitem a escolha de possíveis combinações não lineares dos sinais medidos para a identificação de um modelo para o sistema.

Entretanto, em muitos casos não é possível obter o modelo matemático de um sistema somente pelo princípio de funcionamento do mesmo, uma vez que em certos casos não é possível obter uma

descrição física do mesmo. Nos casos em que não se pode inferir a respeito do modelo físico de um sistema, pois não é possível ter acesso direto ao sistema e ou não se tem informações suficientes a respeito do sistema, ainda é possível obter um modelo do tipo “caixa preta”.

Em geral, nos casos em que se pretende estudar um sistema utilizando um modelo tipo “caixa preta”, as únicas informações que se podem inferir do sistema são obtidas pela aplicação de uma entrada para excitar o sistema, e a medição da saída correspondente a essa entrada.

3.2 Métodos de Identificação de Sistemas Dinâmicos

Em sua grande maioria, os métodos de identificação de sistemas procuram construir um problema de otimização de forma a encontrar os melhores valores para um modelo. Este modelo é o que melhor representa o comportamento do sistema real que se está interessado em estudar, baseado em um conjunto de medidas do mesmo.

Em geral os problemas de otimização possuem como função objetivo algum critério de qualidade a ser minimizado ou maximizado.

O critério a ser definido é a exata descrição matemática do que se procura otimizar, no caso de identificação de sistemas um dos critérios utilizados é o erro de estimação, que pode ser calculado como a diferença entre a saída medida do sistema e a saída calculada pelo modelo estimado.

Alguns autores como por exemplo (Sage & Melsa, 1971) denominam o critério utilizado no processo de otimização como função de custo, pois o mesmo representa um custo ou penalidade que deve ser reduzida durante o processo de identificação. A escolha do critério utilizado depende do tipo de problema a ser resolvido. Deve-se levar em consideração também o fato de que, dependendo do critério escolhido, o algoritmo de otimização pode apresentar uma complexidade elevada.

Na literatura é possível encontrar diversos métodos de identificação do modelo tipo “caixa preta” utilizando as informações ao se aplicar uma entrada ao sistema e medindo a respectiva saída, como por exemplo (Zhao et al., 2010), no qual o autor utiliza métodos estocásticos com cadeias de Markov para determinar um modelo não paramétrico não linear.

3.2.1 Classificação dos Métodos de Identificação de Sistemas

Nos casos em que o modelo do tipo “caixa preta” se mostra mais adequado para descrever o sistema em estudo, podemos dividir os diversos métodos de identificação do modelo do sistema em diversas categorias.

A classificação dos métodos em categorias é baseada primeiramente pelo tipo de análise que se pretende realizar do sistema (métodos paramétricos e não paramétricos), pelo tipo de modelo estimado (contínuo ou discreto), pelo modo como as informações obtidas das medições são interpretadas e tratadas (determinísticos e estocásticos), pelo modo como o conjunto de medidas é processado (métodos de batelada e recursivos) e pela linearidade ou não linearidade do modelo estimado em relação aos parâmetros ou às medidas ou ambos.

Ao se estimar o modelo de um sistema, dependendo do estudo a ser realizado, é possível dividir os métodos de estimação em dois tipos, os métodos de estimação não paramétricos e os métodos de estimação paramétricos (Aguirre, 2007).

Nos métodos de estimação do tipo não paramétricos (Juditsky et al., 1995), o objetivo é obter o comportamento do sistema em termos de sua resposta em frequência, ou sua resposta ao degrau, sem no entanto encontrar uma estrutura de modelo nem tão pouco os valores de seus parâmetros. Esse tipo de método é comumente utilizado quando se está interessado em estudar apenas o comportamento do sistema frente a uma entrada impulsiva ou sua resposta em frequência, ou quando não se tem informações suficientes a respeito do sistema.

Nos métodos do tipo paramétricos, procura-se estimar os valores dos parâmetros de um sistema dado que se conhece a estrutura do modelo do mesmo, nos casos em que as informações que se tem do sistema permitem a determinação de sua estrutura. Quando as informações a respeito do sistema não são suficientes para se conhecer a estrutura, pode-se utilizar algum método para estimar a estrutura do modelo do sistema para então utilizar algum método de estimação paramétrico para a determinação dos valores do parâmetro.

Em relação à caracterização do tipo de sistema podemos classificar um sistema como contínuo ou discreto. Os sistemas cujas equações que o descrevem são equações diferenciais são classificados como sistemas contínuos e a evolução do mesmo a partir de uma dada condição inicial fica especificada em todo instante de tempo $t \geq 0$. Quando as equações que descrevem um sistema são

equações a diferenças, o mesmo é classificado como discreto, para o qual a evolução é especificada apenas em intervalos discretos de tempo (Worden et al., 2002).

Existe uma importante divisão entre os métodos de estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos, que trata da distinção entre métodos determinísticos e estocásticos. Pode-se definir um método como determinístico quando se assume que o mesmo possua um conhecimento exato a respeito das entradas e saídas do sistema e que não haja influência ou geração de valores aleatórios (Mikles & Fikar, 2007). Da mesma forma, pode-se definir um método como estocástico quando o mesmo permite que o sistema contenha perturbações aleatórias e alguma informação a respeito das propriedades dessas perturbações que podem representar algum ruído do canal de medição, ou mesmo algum erro das medidas.

Uma outra divisão que pode ser destacada quando se trata dos métodos de estimação é a de métodos de batelada (*batch methods*) e a de métodos recursivos. A primeira categoria se refere aos métodos que consideram todo o conjunto de medidas no seu processamento para a estimação do modelo, como por exemplo o método de mínimos quadrados, de integração numérica e o cálculo de funções de correlação. Algumas vezes esse métodos são chamados de métodos *off-line* (Mikles & Fikar, 2007). A segunda categoria diz respeito aos métodos que processam gradualmente os dados da medição à medida em que os mesmos são gerados, atualizando e aprimorando a qualidade da estimativa a cada novo dado coletado.

Com relação à linearidade, os métodos de estimação podem se subdividir naqueles em que o modelo utilizado para se estimar o sistema é linear e naqueles em que o modelo é não linear. Para os métodos paramétricos, o modelo a ser estimado pode ser classificado como linear em relação aos parâmetros, quando simplificada é possível aplicar o princípio da superposição, e mais rigorosamente quando o modelo atende a uma série de outros critérios, sendo que uma maior discussão a respeito pode ser encontrada na referência (Worden et al., 2002).

Um ponto a ser ressaltado é que o fato do sistema para o qual se deseja obter uma estimativa ser ou não linear não implica necessariamente que o método a ser utilizado também o seja, pois é possível aplicar métodos que empreguem um modelo linear para se estimar um sistema não linear e o caso recíproco também é possível. Devido à complexidade, observa-se que em geral os métodos lineares sejam mais comumente utilizados, ou pelo menos que sejam a primeira abordagem a ser empregada, restringindo a utilização dos métodos não lineares aos casos em que o comportamento do sistema que se pretende analisar seja predominantemente não linear.

Para a estimação de sistemas lineares por um modelo do tipo “caixa preta”, o objetivo se resume a encontrar uma estrutura que descreva ou que melhor aproxime o comportamento do sistema em estudo, que no caso de sistemas com comportamento “suave” como nas maioria das aplicações, o método pode ser visto como um modesto problema de aproximação.

A figura 3.2.1 apresenta uma ilustração da classificação dos diversos métodos de estimação de sistemas.

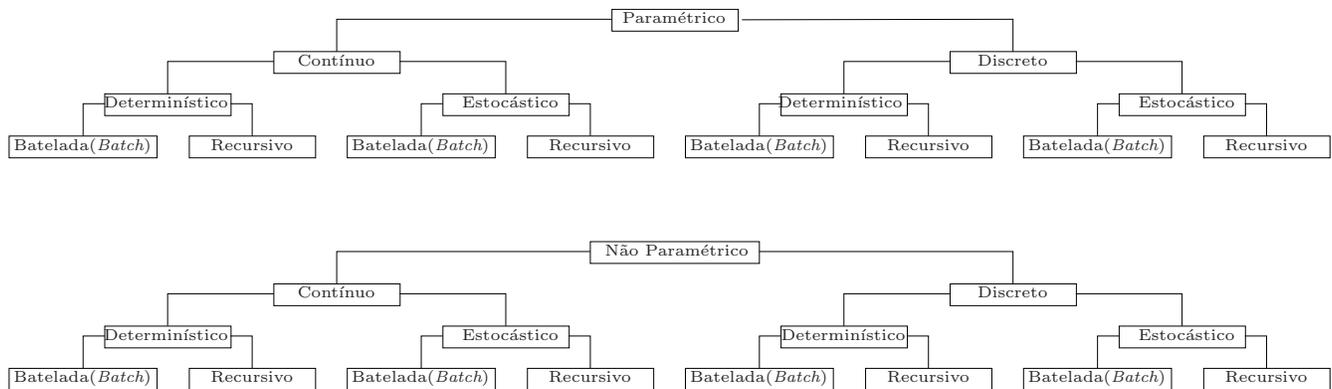


Figura 3.1: Classificação dos métodos de estimação.

3.3 Representação de Sistemas Lineares

De forma geral, sistemas dinâmicos lineares invariantes no tempo podem ser descritos matematicamente pela seguinte equação:

$$s \circ y = Ay + Bu + \nu \quad (3.1)$$

No qual $s \circ y$ representa o operador diferencial $\frac{dy}{dt}$ no caso de sistemas contínuos e o operador avanço unitário $y(k+1)$ no caso de sistemas discretos, y é o vetor de estados do sistema, as matrizes A e B possuem os parâmetros que definem o sistema, u é o vetor de entradas do sistema e ν é uma entrada que nos casos de modelos estocásticos representa o ruído.

Dependendo do interesse de estudo a ser realizado e das características do sistema, pode-se optar por utilizar um modelo contínuo ou discreto para o sistema. Além de ser possível incluir

a entrada ν nos casos em que se possui informações ou se procure estudar algum componente estocástico do sistema como por exemplo o ruído, a entrada ν também pode representar erros do modelo no cálculo da saída. Assim, sua minimização em muitos casos é usada como critério para o cálculo dos parâmetros do modelo.

Na seção seguinte a representação de sistemas lineares a tempo discreto é discutida com mais detalhes, pois para a abordagem adotada para a estimação da margem de estabilidade de tensão, a mesma se mostrou mais adequada. Uma vez que se considera que cada medida é obtida em um tempo especificado pela taxa de amostragem do medidor, um modelo discreto pode representar o comportamento da margem para cada medida obtida.

A presente tese considera as medidas das PMUs como entradas de um sistema dinâmico, cuja variável de estado seria o valor da margem de estabilidade de tensão utilizando um modelo linear discreto. Pode-se considerar cada dado proveniente das PMUs como uma amostra da entrada do sistema e os valores das margens os respectivos valores das variáveis de estado do sistema hipotético.

Utilizando técnicas de identificação de sistemas foi possível estimar os parâmetros de um sistema discreto cujo comportamento se assemelhasse ao comportamento da margem de estabilidade de tensão em relação às medidas das PMUs, no caso as magnitudes e ângulos de fase das tensões das barras que possuíam uma unidade de medida. Para este objetivo o modelo discreto se mostrou mais adequado pois o interesse é encontrar o valor da margem correspondente a cada nova leitura das PMUs em cada instante de amostragem, e não em qualquer instante de tempo.

3.3.1 Representação de Sistemas Lineares Discretos no Tempo

A representação em tempo discreto de um sistema dinâmico considerando uma saída $y(k)$, um vetor de múltiplas entradas $u(k)$ e um sinal de ruído $\nu(k)$ pode ser escrita pela seguinte equação a diferenças (Worden et al., 2002, Mikles & Fikar, 2007, van der Heijden et al., 2004):

$$\mathbf{A}(q)y(k) = \frac{\mathbf{B}(q)}{\mathbf{F}(q)}u(k) + \frac{\mathbf{C}(q)}{\mathbf{D}(q)}\nu(k) \quad (3.2)$$

onde o operador q é definido de tal forma que $q^{-1}y(k) = y(k-1)$ e $\mathbf{A}(q)$, $\mathbf{B}(q)$, $\mathbf{C}(q)$, $\mathbf{D}(q)$ e $\mathbf{F}(q)$ são polinômios ou matrizes de polinômios que dependem da ordem dos vetores de entrada, saída e

ruído definidos da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}(q) &= 1 - a_1q^{-1} - \dots - a_{n_a}q^{-n_a} \\
 \mathbf{B}(q) &= b_1q^{-1} + \dots + b_{n_u}q^{-n_u} \\
 \mathbf{C}(q) &= 1 - c_1q^{-1} - \dots - c_{n_\nu}q^{-n_\nu} \\
 \mathbf{D}(q) &= 1 - d_1q^{-1} - \dots - d_{n_d}q^{-n_d} \\
 \mathbf{F}(q) &= 1 - f_1q^{-1} - \dots - f_{n_f}q^{-n_f}
 \end{aligned}$$

Assim, dependendo dos valores dos polinômios $\mathbf{A}(q)$, $\mathbf{B}(q)$, $\mathbf{C}(q)$, $\mathbf{D}(q)$, e $\mathbf{F}(q)$ tem-se as diversas representações dos modelos utilizados no processo de estimação de parâmetros. A representação do ruído $\nu(k)$ permite que este modelo possa ser utilizado por métodos estocásticos.

A equação (3.2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$y(k) = \mathbf{H}(q)u(k) + \mathbf{G}(q)\nu(k) \quad (3.3)$$

onde:

$$\mathbf{H}(q) = \frac{\mathbf{B}(q)}{\mathbf{A}(q)\mathbf{F}(q)}, \quad \mathbf{G}(q) = \frac{\mathbf{C}(q)}{\mathbf{A}(q)\mathbf{D}(q)} \quad (3.4)$$

Observando a equação (3.3) nota-se que a mesma pode ser a representação em tempo discreto da saída de um filtro do tipo IIR (*Infinite Impulse Response*), desde que se considere uma entrada do tipo impulsiva e que a saída não se anule quando o número de amostras tende ao infinito. Um filtro é do tipo IIR quando, ao se aplicar uma entrada impulsiva finita no tempo sua saída apresenta uma duração infinita. Caso a duração da resposta ao impulso seja finita, ou seja, $\exists M$ tal que $h(k) = 0, \forall k > M$, o filtro será do tipo FIR (*Finite Impulse Response*).

Assim, realizando-se a convolução entre a resposta ao impulso do sistema e a entrada obtemos o seguinte para um filtro IIR:

$$y(k) = \sum_{j=0}^{\infty} h(j)u(k-j) + \nu(k)$$

Se $h(j)$ for assintoticamente estável, então existe um $M < \infty$ tal que $|h(k)| < \epsilon, \forall k > M$, logo para um filtro FIR:

$$y(k) = \sum_{j=0}^M h(j)u(k-j) + \nu(k)$$

A estimativa da margem de estabilidade de tensão é feita utilizando uma representação do sistema que se assemelha com a configuração de um sistema discreto do tipo FIR. Apesar de, em geral, a ordem dos filtros IIR ser menor que do tipo FIR, outras diferenças entre os dois filtros contribuíram para a escolha dos filtros do tipo FIR. As características mais importantes são (Oppenheim & Schaffer, 2009):

- em termos da fase, os filtro IIR apresentam dificuldades de controle, enquanto que os filtros FIR sempre apresentam uma fase linear;
- em termos de estabilidade os filtros do tipo FIR sempre são estáveis, enquanto que os do tipo IIR podem ser instáveis;
- os filtros FIR sempre permitem uma configuração do tipo causal.

A representação do modelo do tipo FIR pode ser obtida da equação (3.2) fazendo-se $\mathbf{A}(q) = 1$, $\mathbf{C}(q) = 1$, $\mathbf{D}(q) = 1$, $\mathbf{F}(q) = 1$ e $\mathbf{B}(q)$ um polinômio arbitrário de ordem M , $n_B = M$.

3.4 Métodos de Identificação Paramétricos Lineares

Como discutido anteriormente o problema de estimação de parâmetros consiste em estimar um conjunto de parâmetros de um modelo matemático que melhor descreve o sistema a ser estudado baseado em medidas de entrada e saída do mesmo. A estimação de parâmetros é realizada quando se conhece a estrutura do sistema, ou quando se possui alguma estimativa de sua estrutura.

No caso dos métodos paramétricos lineares, procura-se determinar os valores dos parâmetros considerando uma estrutura linear para o modelo considerando o conjunto de medidas e as respectivas saídas disponíveis, utilizando para isso algum algoritmo de otimização.

O uso de métodos lineares é possível nos casos em que o sistema a se estimar apresenta um comportamento linear ou muito próximo do linear nas proximidades da região de interesse. Em alguns casos métodos lineares podem ser utilizados para uma averiguação exploratória do problema por serem relativamente mais simples de serem implementados.

O cálculo dos parâmetros pode ser realizado por um algoritmo de otimização que encontrará o valor ótimo dos parâmetros a se estimar de forma a otimizar algum critério (Ljung & Glad, 1994).

3.4.1 Modelo Auto Regressivo com Entradas Exógenas (ARX)

Um dos modelos utilizados em identificação de sistemas é o modelo auto regressivo com entradas exógenas (do inglês ARX *Auto Regressive with eXogenous inputs*) (Keesman, 2011, Aguirre, 2007). Este modelo é obtido atribuindo os seguintes valores para os polinômios: $\mathbf{C}(q) = 1$, $\mathbf{D}(q) = 1$, $\mathbf{F}(q) = 1$ e $\mathbf{A}(q)$ e $\mathbf{B}(q)$ são polinômios arbitrários, resultando em:

$$\mathbf{A}(q)y(k) = \mathbf{B}(q)u(k) + \nu(k) \quad (3.5)$$

que pode ser escrito na forma:

$$y(k) = -a_1y(k-1) - \dots - a_{n_a}y(k-n_a) + b_1u(k-1) + \dots + b_{n_b}u(k-n_b) + \nu(k) \quad (3.6)$$

Denominando-se:

$$\Theta^T = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}] \quad (3.7)$$

$$z^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b)] \quad (3.8)$$

pode-se manipular a equação 3.6 e obter:

$$\begin{aligned} y(1) &= -\sum_{j=1}^{n_a} a_j y(1-j) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j u(1-j) + \nu(1) = z^T(1)\Theta + \nu(1) \\ y(2) &= -\sum_{j=1}^{n_a} a_j y(2-j) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j u(2-j) + \nu(1) = z^T(2)\Theta + \nu(2) \\ &\vdots \\ y(k) &= -\sum_{j=1}^{n_a} a_j y(k-j) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j u(k-j) + \nu(1) = z^T(k)\Theta + \nu(k) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Reescrevendo a equação 3.6 de forma mais compacta temos:

$$y(k) = \Theta^T z(k) + \nu(k) \quad (3.10)$$

3.4.2 Método de Mínimos Quadrados

Quando se considera que o modelo que será estimado é linear com relação aos parâmetros, o problema de minimização da norma do vetor de erro pode ser realizado pelo método de mínimos quadrados (Goodwin & Payne, 1977, van der Heijden et al., 2004).

A utilização deste método para o problema de identificação de sistemas é relativamente simples, além de ser um método bastante flexível no sentido que o mesmo pode ser utilizado tanto nos casos em que se considera um modelo contínuo ou discreto, estocástico ou determinístico.

O método de mínimos quadrados clássico pode ser considerado um método de batelada, pois o mesmo calcula os parâmetros do sistema a ser estimado utilizando todo o banco de dados, encontrando no final os parâmetros. Na próxima seção será mostrada uma modificação no algoritmo dos mínimos quadrados, que permite que o método possa ser utilizado numa versão recursiva.

Neste método, procura-se a minimização do erro quadrático entre a saída nos instantes de amostragem e o resultado da convolução das entradas nos instantes de amostragem com os parâmetros a serem estimados definindo-se o seguinte problema de minimização:

$$\hat{\Theta} = \arg \min \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|(y(k) - z^T(k)\Theta)\|_2^2 \quad (3.11)$$

A equação pode ser escrita na forma matricial definindo se as seguintes matrizes:

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} ; Z = \begin{bmatrix} z^T(1) \\ z^T(2) \\ \vdots \\ z^T(N) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$L(\Theta) = (Y - Z\Theta)^T (Y - Z\Theta) \quad (3.13)$$

O valor de $\hat{\Theta}$ que minimiza a equação 3.11 pode ser encontrado calculando-se o gradiente de 3.11 com relação a Θ e igualando-se a zero, obtendo:

$$\hat{\Theta} = \arg \min L(\Theta) \quad (3.14)$$

$$(Z^T Z) \hat{\Theta} = (Z^T Y) \quad (3.15)$$

Na equação (3.15), o valor $\hat{\Theta}$ é o estimador de mínimos quadrados do parâmetro Θ , que sobre certas condições é fortemente consistente, ou seja $\hat{\Theta} \rightarrow \Theta$ quando $k \rightarrow \infty$. A prova pode ser encontrada em (Goodwin & Payne, 1977).

No caso dos métodos de identificação paramétricos lineares, um estimador para os parâmetros pode ser encontrado através da minimização de um tipo especial de função de perdas (*Loss Function*) $L(\Theta)$ chamada de mínimos quadrados. No caso em que o método de identificação precisa considerar as não linearidades do problema, é necessária uma abordagem não linear, para a qual é possível aplicar o chamado método de mínimos quadrados não linear (Nelles, 2001).

Caso haja informações a respeito da distribuição estatística dos erros de medição $\nu(k)$ na equação 3.5, é possível incluir esta informação na forma de uma matriz de ponderação W multiplicando os erros por fatores de forma a priorizar as medidas com menores erros, resultando numa função de perdas ponderada pela matriz W .

$$L(\Theta) = (Y - Z\Theta)^T W (Y - Z\Theta) \quad (3.16)$$

Além disso é possível utilizar funções de perdas mais genéricas utilizando outras normas para o erro de estimação (Nelles, 2001) cuja expressão mais geral pode ser descrita como se segue.

$$L(\Theta) = \|(Y - Z\Theta)\|_p^{1/p} \quad (3.17)$$

Nos casos em que o modelo que se procura estimar para o sistema não tem uma estrutura linear nos parâmetros, o método de mínimos quadrados apresenta certas particularidades e métodos específicos para encontrar a solução do problema. Na próxima seção são discutidos métodos de identificação para obtenção de modelos não lineares e o critério adotado também é o de minimização do erro quadrático entre a saída estimada e a saída verdadeira. Apesar de ser possível utilizar

diversos tipos diferentes de normas, optou-se pela norma 2 utilizada pela maioria dos trabalhos. Além disso, o problema de estimação tratado não deu indícios de requerer algum tipo específico de critério diferente.

3.5 Identificação Utilizando Sistemas Não Lineares

O estudo de sistemas não lineares sempre foi objeto de pesquisas nos mais diversos campos da engenharia, uma vez que a maioria dos sistemas físicos com os quais os engenheiros precisam lidar não são lineares. Sistemas não lineares apresentam dificuldades inerentes aos mesmos uma vez que o princípio da superposição não é mais válido e como consequência sua análise apresenta complicações que não são encontradas na análise de sistemas lineares. Em muitos casos é possível utilizar métodos de análise de sistemas lineares quando o comportamento do sistema nas proximidades do ponto ao qual o sistema foi linearizado apresentar características semelhantes a de sistemas lineares.

No que diz respeito à identificação de sistemas não lineares, os problemas enfrentados na suas análises se refletem na complexidade dos métodos empregados na identificação dos mesmos. O fato de se analisar sistemas não lineares, não implica necessariamente que o método a ser utilizado precise ser não linear. É possível utilizar métodos lineares de obtenção dos valores dos parâmetros dos modelos não lineares, pois o problema a ser resolvido pode depender linearmente dos valores dos parâmetros.

A classificação adotada para os métodos de identificação de sistemas lineares podem ser utilizadas para classificar os métodos não lineares, pois a mesma só depende do tipo de estratégia e modelo utilizado em cada método e não depende do tipo de sistema a ser estimado. Um dos grandes problemas ao se trabalhar com sistemas não lineares é o fato de não existir uma abordagem única e generalizada, seja analiticamente ou experimentalmente (Worden et al., 2002). Tendo este fato em vista, uma prática comum em identificação de sistemas não lineares é tentar utilizar as diversas técnicas conhecidas e tentar encontrar a que melhor se adapta ao problema enfrentado.

As mesmas descrições utilizadas para classificar os métodos apresentadas no começo do capítulo continuam válidas, e portanto as próximas seções apresentam os métodos utilizados para a determinação de um modelo não linear que relaciona os valores das grandezas medidas pelas PMUs com o valor da margem de estabilidade de tensão.

De maneira semelhante à realizada na seção 3.4, a abordagem utilizada neste trabalho é a de identificação paramétrica, uma vez que no estudo realizado nesta tese pretende-se obter o modelo a partir de um conjunto de dados de entrada e saída, encontrando um modelo não linear do tipo “caixa preta” (Sjöberg et al., 1995).

Nesta tese optou-se por não utilizar métodos não paramétricos pois o interesse principal é determinar se seria possível utilizar um método de identificação de sistemas para se encontrar o valor da margem. Assim, devido à sua simplicidade, os métodos paramétricos foram escolhidos. Um exemplo de uma técnica de identificação não paramétrica de sistemas pode ser encontrada em (Zhao et al., 2010).

3.5.1 Representação de Sistemas Não Lineares

De forma geral, sistemas dinâmicos não lineares invariantes no tempo podem ser representados pela seguinte equação matricial:

$$s \circ y = f(y, u) + \nu \quad (3.18)$$

Da mesma forma que foi apresentada para a representação de sistemas dinâmicos lineares invariantes no tempo (3.1), a representação de sistemas não lineares possui um operador $s \circ y$ que pode representar o operador diferencial $(\frac{dy}{dt})$ no caso de sistemas contínuos e o operador avanço unitário $(y(k + 1))$ no caso de sistemas discretos. Nesta representação, no lugar das matrizes constantes A e B do modelo linear, temos uma função não linear $f(\cdot)$ dos estados e das entradas, além da entrada ν que representa o ruído.

Neste trabalho optou-se por utilizar uma entrada estocástica para representar o ruído ν somada a parcela não linear do sistema e não incluída na função não linear do modelo, pois o interesse não era estudar o comportamento não linear do sistema com o ruído, mas sim representar o erro de predição como um ruído adicionado à saída do modelo não linear.

3.5.2 Métodos não Lineares de Identificação Paramétrica

No caso mais geral de estimação de parâmetros, ou seja o modelo “caixa preta”, os métodos não lineares procuram estimar os parâmetros de modelos de predição que possuem uma estrutura não linear e que relacionam as amostras das entradas e da saída em instantes anteriores. A maioria dos sistemas encontrados na prática são não lineares, entretanto na maioria dos casos o comportamento dos mesmos pode ser estimado de maneira satisfatória por modelos lineares.

Dessa forma, os métodos lineares geralmente são a primeira tentativa de se estimar o comportamento de um sistema, uma vez que os métodos não lineares apresentam estrutura mais complicada e elaborada. Em geral os métodos não lineares são utilizados quando a estimativa obtida pelos métodos lineares não é satisfatória, quando o sistema possui não linearidades cujo comportamento se está interessado, ou quando as dinâmicas linear e não linear são representadas por conjuntos separados de medidas (Ljung, Sjöberg et al., 1995).

Nos métodos de identificação que utilizam modelos não lineares, semelhante ao que foi realizado no caso dos modelos lineares, estima-se os parâmetros de uma função não linear que apresente um comportamento similar ao do sistema que se pretende obter uma estimativa. Diferentemente dos métodos lineares, nos métodos não lineares procura-se estimar uma relação não linear entre as entradas e a saída em instantes anteriores para se calcular um estimativa do valor atual da saída do sistema.

3.5.3 Modelo Não Linear Auto Regressivo com Entradas Exógenas (NARX)

Nos métodos de identificação não linear, estima-se os parâmetros de uma função não linear que possui comportamento similar ao do sistema em estudo. O método permite encontrar um modelo que representa uma relação não linear entre as entradas e as saídas em instantes anteriores de tempo. O modelo encontrado utiliza as entradas e saídas medidas em instantes anteriores de tempo para estimar um valor para a saída no instante atual.

O modelo NARX possui uma estrutura que é uma extensão do ARX para sistemas lineares e

cuja expressão geral é (Worden et al., 2002):

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_k-n_b+1)) \quad (3.19)$$

na qual $y(k)$ representa os valores da saída no instante k , $f(\dots)$ é uma função não linear de um número finito de valores das entradas $u(k-n_b+1)$ e da saída $y(k-n_a)$, n_a é o número de termos de predição utilizados da saída, n_b é o número termos de predição utilizados da entrada e n_k é o atraso entre a entrada e a saída em termos do número de amostras.

A função que descreve o estimador possui uma estrutura mais geral e pode ser composta por uma parte linear e uma parte não linear como em (3.20).

$$F(x) = (x-r)PL^T(x) + d + g(Q(x-r)) \quad (3.20)$$

na qual, x é um vetor composto pelos valores das entradas e saídas correspondentes a instantes anteriores de tempo, chamado de vetor de regressores. O termo $L^T(x) + d$ é a saída do bloco que representa a função linear que pode ser afim se $d \neq 0$. $g(Q(\dots))$ representa a saída do bloco que representa a função não linear. As matrizes P e Q são matrizes de projeção usadas para tornar os cálculos bem condicionados, seus valores são determinados pela Análise de Componentes Principais (do inglês *PCA Principal Components Analysis*) (Jolliffe, 2002) do banco de dados utilizado para a estimativa. r é o vetor médio dos regressores x .

O diagrama de blocos do estimador não linear pode ser visto na Figura 3.2.

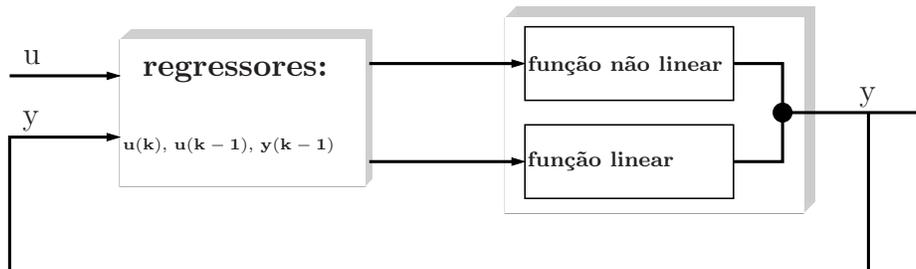


Figura 3.2: Diagrama de blocos do estimador não linear

O objetivo do método é determinar L , r , d , Q e um conjunto de parâmetros que especifica $g(\dots)$. Caso se deseje trabalhar com modelos puramente não lineares, pode-se impor os valores de L e d como zero.

3.5.4 Estimador não linear Utilizando Redes Sigmoidais

A parte não linear da função do estimador pode ser qualquer relação não linear entre os valores da entrada e da saída. Uma das funções disponíveis no *toolbox* de identificação de sistemas do *Software* matemático **MATLAB** é a função sigmoideal cuja expressão é dada por:

$$\begin{aligned} g(x) &= \sum_{\kappa=1}^n \alpha_{\kappa} \mathcal{K}(\beta_{\kappa}(x - \gamma_{\kappa})) \\ \mathcal{K}(u) &= (e^u + 1)^{-1} \end{aligned} \quad (3.21)$$

No caso sigmoideal o objetivo do método é determinar α_{κ} e β_{κ} , no qual β_{κ} é um vetor linha de modo que $\beta_{\kappa}(x - \gamma_{\kappa})$ seja um escalar. O parâmetro n é o número de unidades de função não lineares que pode ser determinada para se aumentar a precisão do método. Na implementação não linear, os valores de L e d são zerados, de forma que o estimador seja puramente não linear.

3.5.5 Método de Mínimos Quadrados Não Linear

O método de mínimos quadrados não linear é bastante similar à versão linear apresentada na seção 3.4.2. Entretanto o problema de otimização resultante é do tipo não linear, pois assume-se nesse caso que o modelo a ser estimado é não linear. Desta forma, o método requer que seja utilizado algoritmos de solução de problemas de otimização não linear. Pode-se formular o problema de encontrar uma estimativa para o valor dos parâmetros do modelo da seguinte maneira (Keesman, 2011):

$$\hat{\Theta} = \arg \min \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|(y(k) - f(y(k), u(k), \Theta))\|_2^2 \quad (3.22)$$

A equação pode ser escrita na forma matricial definindo se as seguintes matrizes:

$$Y = \begin{bmatrix} y(2) \\ y(3) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}; \mathbf{f}(\Theta) = \begin{bmatrix} f(y(1), u(1), \Theta) \\ f(y(2), u(2), \Theta) \\ \vdots \\ f(y(N-1), u(N-1), \Theta) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Na forma matricial definindo-se uma função de custo tem-se:

$$L(\Theta) = (Y - \mathbf{f}(\Theta))^T (Y - \mathbf{f}(\Theta)) \quad (3.24)$$

onde Θ é um vetor que contém os parâmetros que caracterizam a função não linear e y é a saída medida correspondente à entrada u .

Como critério de otimização do método utiliza-se a função de custo (3.24), e uma vez que a mesma é não linear em relação aos parâmetros de interesse, sua minimização se torna mais difícil. Como o objetivo é minimizar $L(\Theta)$, muitos métodos iniciam a busca pelo valor de $\hat{\Theta}$ que minimiza a função de custo utilizando expansão em série de Taylor em torno de uma estimativa inicial para os parâmetros.

Diferenciando (3.24) em relação a Θ e igualando a zero obtém-se:

$$\frac{\partial L(\Theta)}{\partial \Theta} = 0 \quad \Rightarrow \quad -2 \frac{\partial \mathbf{f}(\Theta)^T}{\partial \Theta} (Y - \mathbf{f}(\Theta)) = 0 \quad (3.25)$$

Diversos métodos encontrados na literatura utilizam como ponto de partida a abordagem mostrada em (3.25). Em geral, os métodos procuram encontrar a solução linearizando (3.25) e por meio de um processo iterativo encontrando o valor de Θ que é solução para o problema de mínimos quadrados não linear.

Um dos métodos que utilizam essa abordagem é o método do gradiente, que utiliza informações do gradiente de (3.25) para atualizar as variáveis. A direção para a correção do parâmetro é dada por um fator multiplicativo do “gradiente”, mais especificamente da derivada do vetor de funções como se segue:

$$\Theta_{i+1} = \Theta_i - \lambda \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\Theta)^T}{\partial \Theta} \right|_{\Theta=\Theta_i} (Y - \mathbf{f}(\Theta_i)) \quad (3.26)$$

Um dos problemas inerente ao método do gradiente simples, ou seja, sem otimização de passo, é o fato do algoritmo calcular um incremento para a atualizações das variáveis muito pequeno nas regiões em que a função apresenta um valor de gradiente reduzido, em geral distante dos mínimos ou máximos, enquanto que nas regiões próximas de mínimos e máximos, o incremento calculado utilizando o valor do gradiente é relativamente grande (Ranganathan, 2004).

Partindo do princípio que o interesse é encontrar esses pontos de mínimos e máximos, seria interessante que os incrementos nas regiões mais distantes dos pontos de interesse fossem maiores

para que o método convergisse rapidamente e que nas proximidades dos pontos de mínimos ou máximos os incrementos fossem relativamente menores para que ao se caminhar no espaço de variáveis não se ultrapasse esses pontos, melhorando a convergência do método.

Um outro problema de convergência que pode ocorrer no método do gradiente é o fato de a curvatura da função poder mudar em função da direção escolhida, uma vez que o método utiliza apenas a informação do gradiente e não a informação da curvatura ou pontos de inflexão da função que está contida nas derivadas de segunda ordem.

Para exemplificar o problema da falta de informação da curvatura, considere um caso em que haja um vale comprido e estreito na superfície da função de erro quadrático (3.25), desse modo o valor do gradiente na direção longitudinal à base do vale é pequeno e o valor do gradiente na direção transversal é grande. Neste exemplo, como o algoritmo se baseia somente no valor do gradiente, o mesmo acabaria fazendo com que a direção de busca apontasse mais para as laterais do vale do que na longitudinal ao vale. O ideal neste caso seria caminhar mais na direção longitudinal ao vale, pois a probabilidade de encontrar o ponto de máximo ou mínimo é maior no interior do vale.

Este problema pode ser contornado pelo uso de informações a respeito da curvatura ou inflexão da função pela adição de derivadas de segunda ordem no algoritmo, o que pode ser feito aplicando-se o método de Newton-Raphson para encontrar a solução de (3.25).

Definindo-se

$$J(\Theta_i) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\Theta)^T}{\partial \Theta} \right|_{\Theta=\Theta_i} (Y - \mathbf{f}(\Theta_i)) \quad (3.27)$$

o método de Newton lineariza $J(\Theta)$ em torno do ponto Θ_i^* , considerando que em torno desse ponto uma aproximação de segunda ordem de $f(\Theta)$ é precisa o suficiente. Pode-se obter a seguinte expressão para a atualização iterativa do vetor de parâmetros Θ que fazem $J(\Theta) = 0$:

$$\Theta_{i+1} = \Theta_i - \left(\left. \frac{\partial J(\Theta)}{\partial \Theta} \right|_{\Theta=\Theta_i} \right)^{-1} J(\Theta_i) \quad (3.28)$$

Desta forma, a informação a respeito da curvatura da função, ou seja, da Hessiana é utilizada para a atualização dos valores dos parâmetros e está contida no termo $\frac{\partial J(\Theta)}{\partial \Theta}$. Esta informação é utilizada para controlar o tamanho do passo na direção contrária ao do gradiente, uma vez que se deseja minimizar a função de erro.

Um outro método comumente utilizado é o método de Gauss-Newton (Fletcher, 1987), no qual

se procura resolver o problema linearizando $f(\Theta)$ em torno do valor conhecido de Θ_i^* que pode ser uma estimativa inicial ou seu último valor atualizado, da seguinte forma:

$$\mathbf{f}(\Theta) \approx \mathbf{f}(\Theta_i^*) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\Theta)}{\partial \Theta} \right|_{\Theta=\Theta_i^*} (\Theta - \Theta_i^*) \quad (3.29)$$

Aplicando-se o mesmo procedimento utilizado no método de mínimos quadrados, pode-se obter a seguinte expressão para a função de custo associada:

$$L(\Theta) = \left(Y - \mathbf{f}(\Theta_i^*) - \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\Theta)}{\partial \Theta} \right|_{\Theta=\Theta_i^*} (\Theta - \Theta_i^*) \right)^T \left(Y - \mathbf{f}(\Theta_i^*) - \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\Theta)}{\partial \Theta} \right|_{\Theta=\Theta_i^*} (\Theta - \Theta_i^*) \right) \quad (3.30)$$

Definindo-se

$$\begin{cases} \hat{Y}(\Theta_i^*) = Y - \mathbf{f}(\Theta_i^*) + G(\Theta_i)\Theta_i^* \\ G(\Theta_i) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\Theta)}{\partial \Theta} \right|_{\Theta=\Theta_i^*} \end{cases} \quad (3.31)$$

obtém-se a seguinte função de custo:

$$L(\Theta) = \left(\hat{Y}(\Theta_i^*) - G(\Theta_i)\Theta \right)^T \left(\hat{Y}(\Theta_i^*) - G(\Theta_i)\Theta \right) \quad (3.32)$$

Realizando-se o mesmo procedimento realizado para o método de mínimos quadrados clássico, pode se obter a expressão para a atualização do vetor de parâmetros como se segue:

$$\begin{aligned} \Theta_{i+1} &= \Theta_i + (G^T(\Theta_i)G(\Theta_i))^{-1}G^T(\Theta_i)(Y - \mathbf{f}(\Theta_i^*)) \\ &= \Theta_i + (G^T(\Theta_i)G(\Theta_i))^{-1}J(\Theta_i) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Uma característica importante a ser ressaltada nos métodos de Newton-Raphson e de Gauss-Newton é que ambos assumem que a função a ser minimizada pode ser adequadamente aproximada pela sua expansão em série de Taylor de segunda ordem, podendo-se desprezar os termos de ordem mais elevada. Entretanto, no caso do método de Gauss-Newton, o termo que representa a informação da curvatura é aproximada, ou seja, a Hessiana $\frac{\partial J(\Theta_i)}{\partial \Theta}$ da função é representada pelo termo $G^T(\Theta_i)G(\Theta_i)$.

Em problemas de otimização, os métodos em que a matriz Hessiana não é calculada, e uma aproximação para a mesma é utilizada, são denominados métodos *Quasi-Newton*. Em geral a

Hessiana é estimada analisando-se sucessivos vetores gradientes (Fletcher, 1987, Bonnans et al., 2006, Davidon, 2006). Os métodos *Quasi-Newton* são uma generalização do método da secante para encontrar as raízes da primeira derivada em problemas multi-dimensionais.

Uma das vantagens dos métodos *Quasi-Newton* é o fato de não ser necessário calcular a expressão exata para a Hessiana, o que em muitos casos é interessante, uma vez que dependendo da função pode ser muito difícil ou mesmo inviável na prática.

Uma outra técnica iterativa muito utilizada para a solução de problemas de minimização denominada algoritmo de Levenberg-Marquardt (Gavin, 2011, Ranganathan, 2004), incorpora em sua essência uma mesclagem entre o método do gradiente e o de Gauss-Newton.

O algoritmo se baseia primeiramente numa observação de Levenberg (Levenberg, 1944) de que os métodos do gradiente simples e o de Gauss-Newton são complementares em relação às vantagens que cada um apresenta, propondo a seguinte expressão para a regra de atualização:

$$\hat{\Theta}_{i+1} = \hat{\Theta}_i - \alpha_i (G^T(\Theta_i)G(\Theta_i) + \lambda I)^{-1} J(\Theta_i) \quad (3.34)$$

A matriz $G^T(\Theta_i)G(\Theta_i)$ é a aproximação para a Hessiana avaliada em $\hat{\Theta}_i$, e representa a informação da curvatura da função. A matriz I é a matriz identidade que representa a contribuição na direção de atualização da variável de acordo com o gradiente associado a um controle de passo pela variável λ .

O controle de passo segue uma lógica de forma a utilizar de maneira otimizada as vantagens do método do gradiente simples e do método de Gauss-Newton. Quando a atualização acarreta uma diminuição do erro, isso indica que a função neste ponto possui uma boa aproximação quadrática e então o valor de λ é reduzido, reforçando a porção correspondente à derivadas de segunda ordem pela Hessiana. Entretanto se após a atualização o erro aumentar, isto é indício de que a função em torno da região atual não tem uma boa aproximação quadrática, desta forma o valor de λ é aumentado e a atualização da variável terá uma componente maior na direção do gradiente e não no da Hessiana.

Uma outra parcela do método se deve à contribuição de Marquardt (Marquardt, 1963), o qual observou que no algoritmo de Levenberg, quando o valor de λ é muito grande, a informação das derivadas de segunda ordem não são levadas em consideração para incluir a informação da curvatura no algoritmo de forma a escalonar os componentes do gradiente para a atualização da

variável de acordo com a curvatura.

Marquardt propôs substituir a matriz identidade da expressão 3.34 por uma matriz que contém apenas os elementos da diagonal da matriz Hessiana. Esta alteração tem por objetivo aumentar o movimento nas direções em que o valor do gradiente é menor, e sua expressão é dada por:

$$\hat{\Theta}_{i+1} = \hat{\Theta}_i - \alpha_i (G^T(\Theta_i)G(\Theta_i) + \lambda \text{diag}[G^T(\Theta_i)G(\Theta_i)])^{-1} J(\Theta_i) \quad (3.35)$$

Uma vez que a Hessiana é proporcional à curvatura da função, esta nova expressão para a atualização da variável implica em passos maiores nas direções em que a curvatura é pequena, por exemplo em regiões mais planas, e passos menores nas direções em que a curvatura é grande, com grande variação da inclinação.

De modo geral os algoritmos de cálculo do vetor de parâmetros Θ podem ser expressos como problemas de otimização em que se procura a minimização de algum critério. Em (Keesman, 2011) e (Ngia et al., 1998) são discutidos alguns algoritmos iterativos para o cálculo dos parâmetros do modelo.

Na referência (Keesman, 2011) o autor procura generalizar alguns dos algoritmos existentes para resolver o problema de minimização da seguinte forma:

$$\hat{\Theta}_{i+1} = \hat{\Theta}_i - \alpha_i R_i^{-1} J(\Theta_i) \quad (3.36)$$

Na expressão 3.36, α_i é uma variável utilizada para escalonar o tamanho da atualização da variável na direção do gradiente. Seu valor é calculado em cada iteração de forma a reduzir o valor da função que se pretende otimizar. O valor de α_i em geral é obtido por um procedimento de busca linear, e em alguns casos pode ser uma constante ou uma função decrescente pré especificada do contador de iteração i (Keesman, 2011).

A matriz R_i que modifica o valor do gradiente na expressão do processo iterativo, também é a que permite a generalização da expressão de atualização do processo iterativo, pois dependendo da escolha de sua estrutura é possível representar as regras de atualização dos diversos métodos em uma só expressão.

No caso de se escolher a matriz R_i , como a matriz identidade, obtemos a expressão do método do gradiente simples (3.26), acrescido de um controle de passo pela variável α_i . A expressão que

representa a regra de atualização utilizada no método de Newton (3.28), pode ser obtida atribuindo à matriz R_i a matriz Hessiana da função do erro quadrático.

De maneira semelhante a expressão para o método de Gauss-Newton (3.33) pode ser obtida atribuindo-se a aproximação $G^T(\Theta_i)G(\Theta_i)$ para a Hessiana à matriz R_i . Analogamente, a expressão para o método de Levenberg-Marquardt (3.35) pode ser obtida escolhendo-se de forma apropriada a matriz R_i . A Tabela 3.1 resume os valores que a matriz R_i pode assumir para representar cada um dos métodos citados.

Tabela 3.1: Valores de R_i em (3.36) para cada método.

	Gradiente	Newton	Gauss-Newton	Levenberg-Marquardt
R_i	I	$\left. \frac{\partial J(\Theta_i)}{\partial \Theta} \right _{\Theta=\Theta_i}$	$G^T(\Theta_i)G(\Theta_i)$	$G^T(\Theta_i)G(\Theta_i) + \lambda \text{diag}[G^T(\Theta_i)G(\Theta_i)]$

É importante ressaltar que o método de Levenberg-Marquardt é um método heurístico, logo, não é possível garantir que o ótimo global será encontrado. Um outro fato importante a ser ressaltado é que todos os métodos descritos pela expressão geral (3.36) apresentam um ponto fraco, pois todos dependem das inversas de matrizes para calcular a atualização. Apesar de existirem técnicas utilizando algoritmos de pseudo-inversas, como por exemplo o método de decomposição em valores singulares, o custo computacional pode ser elevado caso o número de parâmetros a serem estimados seja grande.

Capítulo 4

Monitoramento Baseado em Medição Fasorial Sincronizada

4.1 Introdução

Os sistemas de energia elétrica vêm sofrendo uma série de transformações ao longo das últimas décadas, tornando a tarefa de manter a operação do mesmo segura, confiável e eficiente um verdadeiro desafio. Dentre as mudanças ocorridas é possível citar o aumento expressivo das fontes alternativas de energia e as condições impostas por um mercado de energia cada vez mais influenciado por decisões políticas e econômicas.

Um outro fato importante é que a demanda por energia elétrica está em constante crescimento, modulada pelo desempenho econômico do país. Além disso do fato de o número de interconexões e integração com sistemas que anteriormente estavam isolados, contribui para o aumento da complexidade da tarefa de operar de forma confiável e eficiente um sistema que por si só já demandava um elevado grau de complexidade.

Tendo em vista este cenário, as empresas do setor elétrico estão cada vez mais interessadas em um sistema de monitoramento com uma cobertura da rede mais abrangente (WAMS *Wide Area Monitoring System*), ou mesmo um sistema de controle e proteção abrangente (WAMPACS *Wide Area Monitoring Protection And Control System*) (Terzija, 2007, Terzija et al., 2011).

A sigla PMU (*Phasor Measurement Unit*) se refere a um termo genérico que descreve dispositivos capazes de medir grandezas elétricas e produzir informações a respeito dos fasores de tensão

e corrente de forma sincronizada por um sinal obtido do sistema de GPS utilizado pelos satélites. Este equipamento possui a tecnologia que compõe a base do sistema de medição sincronizada e o novo monitoramento em tempo real do sistema.

Desde a década de 80 muitos progressos vêm sendo alcançados no desenvolvimento de métodos e tecnologia para a obtenção de medidas precisas, rápidas o suficiente para aplicações em tempo real e que abrangessem uma grande parcela do sistema de transmissão sem que a confiabilidade dos dados das medidas fosse severamente comprometida (Martin & Carroll, 2008).

Historicamente, a tecnologia que possibilitou o surgimento da medição sincronizada dos fasores remonta à década de 70 com o desenvolvimento do relé de distância por componentes simétricas (SCDR *Symmetrical Components Distance Relay*). Logo após, com o desenvolvimento de técnicas de sincronização de amostras com um sinal de *clock*, e finalmente com o surgimento do primeiro protótipo de uma unidade de medição fasorial pela *Virginia Tech* (Phadke, 2002).

Um dos primeiros trabalhos a respeito de medição sincronizada foi o artigo (Phadke et al., 1983), no qual são apresentadas as primeiras ideias de obtenção dos fasores de sequência positiva das grandezas elétricas das barras utilizando amostras do sinal medido, um sinal de *clock* para sincronismo e obtenção dos valores dos ângulos dos fasores.

Esta referência também estabeleceu técnicas para a obtenção da frequência e da taxa de mudança de frequência (ROCOF *Rate of Change Of Frequency*) da barra em que está instalado o medidor, considerando que o sistema está em regime permanente.

A referência (Phadke & de Moraes, 2008) apresenta um panorama da utilização da tecnologia de medição sincronizada no âmbito das WAMS em diversas partes do mundo, ressaltando a importância do tema para a área de análise de sistemas de energia elétrica.

No Brasil os estudos envolvendo equipamentos capazes de realizar medições sincronizadas de grandezas elétricas começaram no início dos anos 90, pelo **GCOI** (Grupo Coordenador para a Operação Interligada), antes mesmo do início do processo de desregulamentação do setor elétrico.

As dificuldades financeiras enfrentadas pelo setor elétrico na década de 90 atrasaram o projeto, até por volta de 1999, quando o **ONS** (Operador Nacional do Sistema) começou a operar o **SIN** (Sistema Interligado Nacional). Neste mesmo ano, um grande blecaute ocorreu, e o interesse pelo projeto de aplicações de PMUs voltou a crescer, apesar de que na época o propósito principal era o de se ter registros que pudessem ser utilizados para analisar o desempenho dinâmico do sistema

durante eventos (Moraes et al., 2008).

Em 2000 o **ONS** definiu algumas especificações para um sistema de medição sincronizada, e iniciou o processo de licitação, para que essas unidades de medição registrassem perturbações dinâmicas de longa duração do sistema. Este processo de licitação infelizmente não foi concluído por diversas razões, incluindo alguns problemas de regulamentação com a **ANEEL** (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Em 2005, após uma reformulação no projeto em conjunto com a **ANEEL**, uma resolução foi criada estabelecendo as diretrizes, responsabilidades e tarefas do **ONS** e dos agentes do sistema para a implementação do sistema de medição sincronizada de fasores.

De modo geral o projeto foi modificado, partindo-se do formato original que tinha uma visão mais centralizada, para um formato que apresentava características mais descentralizadas. Dentre as responsabilidades e tarefas atribuídas ao **ONS**, pode-se destacar a definição e especificação de todos os equipamentos envolvidos na estrutura do sistema de medição fasorial, a alocação das PMUs e instalação de uma **PDC** (*Phasor Data Concentrator*), coordenação dos testes de certificação das PMUs e coordenação e definição de agendamento da instalação das PMUs por parte dos agentes da operação.

Os agentes da operação ficaram incumbidos da compra, instalação e manutenção das PMUs a serem instaladas nas subestações e o fornecimento de um sistema de comunicação que cumprisse as exigências e cronogramas do **ONS**. O **ONS** realizou testes de certificação de algumas PMUs baseado nos critérios e recomendações da norma do IEEE (IEEE Power Engineering Society, 2006) e os resultados e históricos do projeto de certificação podem ser vistos em (Moraes et al., 2012).

4.2 Medição sincronizada e fasores

O fasor é uma importante ferramenta matemática utilizada para representar e possibilitar operações de uma maneira mais simplificada de uma forma de onda contínua do tipo senoidal utilizando um número complexo. Para um sinal contínuo senoidal no tempo com frequência constante e igual a $\omega_0 = 2\pi f_0$, o mesmo pode ser representado por um número complexo cuja magnitude corresponde ao valor eficaz do sinal, e cuja fase corresponde à fase do sinal no momento da medição.

A representação fasorial das amostras do sinal é obtida utilizando-se a transformada discreta

de Fourier nas amostras obtidas pelos medidores (Phadke et al., 1983) (Phadke & Thorp, 2008). Aliado a esta informação há o fato de se utilizar um sinal de referência de tempo absoluto como por exemplo o (UTC *Universal Time Coordinated*), possibilitou que os fasores obtidos de locais geograficamente distantes pudessem utilizar uma referência de tempo comum.

Desta forma, a precisão da medida do valor da fase está condicionada aos intervalos de tempo entre os pulsos utilizados como referência de tempo, assim por exemplo uma diferença de tempo de $1\mu\text{s}$ corresponde a $0,022$ graus num sistema de 60 Hz e a $0,018$ graus num sistema de 50 Hz.

No caso específico das PMUs o sinal de sincronismo utilizado para servir de referência para a obtenção dos fasores é o pulso de *clock* do relógio atômico utilizado pelo sistema de posicionamento global **GPS**, cuja precisão é da ordem de micro segundos. O sistema de posicionamento global atualmente opera com 24 satélites em órbita, de forma que a qualquer momento pelo menos 4 deles são visíveis de qualquer ponto da terra.

A posição é obtida calculando-se o tempo que as respostas do sinal dos 4 satélites demoram para chegar no receptor, em relação ao relógio de precisão interno ao receptor, além da informação da posição de cada um dos satélites bem como da velocidade de propagação do sinal.

Uma PMU é capaz de fornecer não apenas os fasores da tensão e da corrente, mas também a frequência e a taxa de variação de frequência **ROCOF** (*Rate Of Change Of Frequency*). Nesta tese discutiremos os aspectos relativos somente aos fasores, entretanto as outras grandezas medidas possuem características associadas a elas que são discutidas em detalhes nas diversas normas existentes na literatura.

Uma possível representação de um sinal senoidal contínuo é apresentado em (4.1), no qual é possível observar a dependência com o tempo tanto da amplitude $X_M(t)$ do sinal como da frequência $f(t) = g(t) + f_0$, em que $g(t)$ representa uma função da frequência medida com o tempo e f_0 é a frequência nominal do sistema.

$$\begin{aligned}
 x(t) &= X_M(t) \cos(2\pi \int f(t)dt + \phi) \\
 &= X_M(t) \cos(2\pi \int (g(t) + f_0)dt + \phi) \\
 &= X_M(t) \cos(2\pi f_0 t + (2\pi \int g(t)dt + \phi))
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

A representação por sincrofasores para a forma de onda (4.1) é dada por:

$$\vec{X}(t) = \frac{X_M(t)}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi \int g(t) dt + \phi)} \quad (4.2)$$

Considerando um caso especial em que a amplitude do sinal é constante e a função da frequência com o tempo é contante $g(t) = \Delta f = f - f_0$, o sincrofasor correspondente é:

$$\vec{X}(t) = \frac{X_M}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi \Delta f t + \phi)} \quad (4.3)$$

Analisando-se a expressão (4.3) é possível notar certas particularidades na representação por sincrofasores:

- O sincrofasor gira no plano complexo a uma taxa uniforme Δf .
- Se a frequência do sinal f for diferente da frequência nominal e menor que $2f_0$ ¹, então um conjunto de sincrofasores obtidos em intervalos de tempo regulares $T_0 = \frac{1}{f_0}$, apresentarão magnitude constante e os valores das fases mudam uniformemente a uma taxa de $2\pi(f - f_0)T_0$.
- O sincrofasor é uma função do tempo, deste modo, seu valor irá refletir mudanças nos parâmetros do sinal medido. Estas mudanças são consideradas dentro dos algoritmos de estimação do fasor.

O IEEE elaborou uma norma para uniformizar e padronizar os requisitos básicos dos equipamentos de medição e dos protocolos de comunicação, as definições e termos relacionados à medição e os critérios para a avaliação da qualidade dessa medição.

A primeira norma foi publicada em 1995 (IEEE Power Engineering Society, 1995). Esta norma foi revisada em 2005 (IEEE Power Engineering Society, 2006), e incluiu, dentre outras mudanças, um critério para a avaliação da qualidade do fasor medido. Este critério permanece até hoje na última versão da norma.

A referência (Sykes et al., 2007) apresenta uma revisão dos conceitos desenvolvidos pela revisão da norma de 2005, e em especial uma análise da estimação do fasor baseado em transformadas de Fourier quando o sistema opera em uma frequência diferente da nominal, além de propor um

¹O cálculo de fasores para frequências fora da nominal gera um erro acumulativo conhecido como vazamento espectral, que pode não ser significativo caso o erro de frequência esteja dentro da faixa de Nyquist

algoritmo para a correção do valor do fasor. O fato do sistema poder transitar de uma condição de regime para outra, e o sincrofasor obtido (4.3) também ser função do tempo, fazem com que os algoritmos utilizados em sua medição possuam alguma estratégia para lidar com o fato de o sistema não estar exatamente na frequência nominal.

A referência (Martin et al., 2008) realiza uma análise da norma de 2005, ressaltando além das características dos sincrofasores durante transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, a influência de sinais de outras frequências e da sobreposição dos espectros devido ao processo de amostragem. Além disso, a referência faz alusão às diversas possíveis aplicações das PMUs para a estimação de estado, análise de instabilidade de tensão, margem de capacidade de transferência transitória, cálculo de parâmetros de linhas de transmissão, sistemas de controle e proteção em tempo real, além de outras aplicações.

Uma revisão mais recente dividiu a norma em duas partes, uma que trata das questões relacionadas à sua utilização para a medição (IEEE Power Engineering Society, 2011a), e a outra parte trata das questões envolvidas na transferência de dados (IEEE Power Engineering Society, 2011b).

4.3 Descrição esquemática do equipamento

As normas desenvolvidas pelo IEEE descrevem os requisitos que os equipamentos que constituem as PMUs devem atender de forma a assegurar uma boa qualidade do parâmetro medido. Desta forma, cada fabricante tem a liberdade de configurar seus equipamentos apenas assegurando que os critérios sejam respeitados.

Em vista deste fato, a Figura 4.1 apresenta um possível diagrama esquemático com os principais componentes de um sistema de monitoramento formado por PMUs e uma PDC, no qual é possível identificar os componentes que realizam a leitura propriamente dita, que na figura são representados pelos **TPs** (Transformadores de Potencial) e os **TCs** (Transformadores de Corrente), um receptor do sinal de GPS, tanto em cada PMU como também na PDC.

Além disso, na figura pode-se observar a infraestrutura de comunicação que transmite os dados obtidos pelas várias PMUs até o PDC. A norma (IEEE Power Engineering Society, 2011b) não define um meio físico ou protocolo de comunicação específico, fornecendo apenas as especificações básicas dos formatos das mensagens com as informações dos sincrofasores. Sendo assim, é possível

que o sistema possua um protocolo definido pelo fabricante ou mesmo utilize o protocolo TCP/IP.

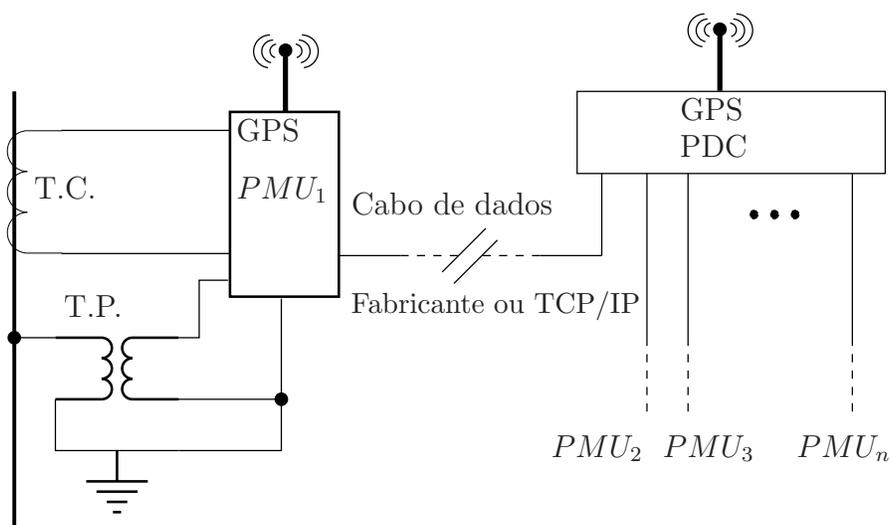


Figura 4.1: Diagrama esquemático de um sistema contendo PMUs e suas conexões com uma PDC associada.

Baseado na sugestão da norma (IEEE Power Engineering Society, 2011a), um possível diagrama esquemático da PMU propriamente dita pode ser visto na Figura 4.2, em que é possível observar como a referência de tempo absoluta fornecida pelo relógio atômico do sistema GPS é utilizada para ser um pulso de sincronismo para o conversor analógico digital, além de servir como referência para o oscilador em quadratura que produz as partes real e imaginária do fasor sincronizado.

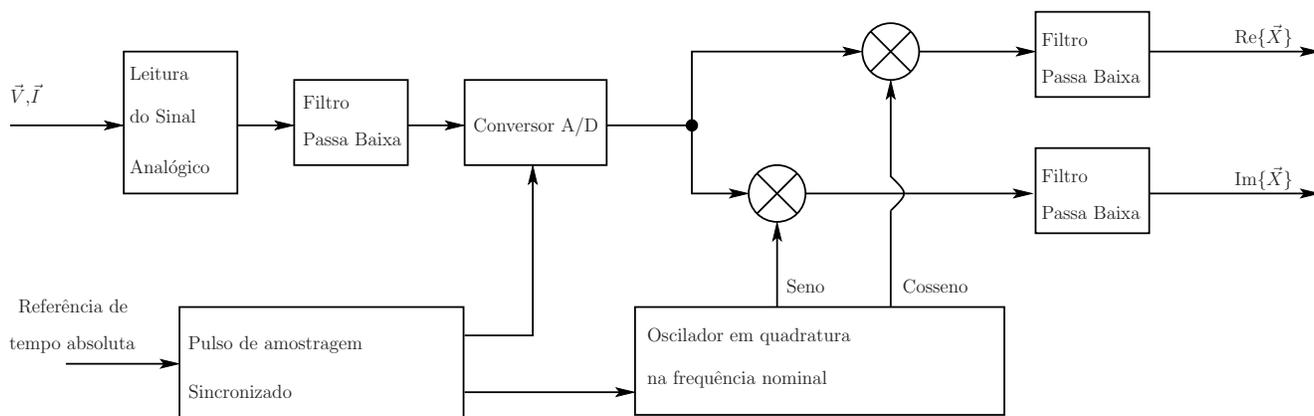


Figura 4.2: Diagrama esquemático de uma PMU.

A norma (IEEE Power Engineering Society, 2011a) também menciona outras implementações para a PMU, como por exemplo, a amostragem seguidora de frequência, utilizando uma portadora seguidora de frequência, ou mesmo métodos não lineares de estimação. Analisando-se a Figura 4.2 nota-se que neste esquema típico de estimação do fasor diversos filtros passa baixa são utilizados. Sendo assim, a norma recomenda que na etiqueta de tempo dos fasores seja considerada uma compensação para o atraso que pode ocorrer no processo da conversão analógico digital, no processo de filtragem e no processo como um todo.

4.4 Qualidade da medição

Para avaliar a qualidade do sincrofasor medido, na revisão de 2005 da norma (IEEE Power Engineering Society, 2006) o IEEE elaborou um critério para avaliar a qualidade da unidade de medida, chamado TVE (*Total Vector Error*), cuja expressão pode ser vista na equação (4.4).

$$TVE(k) = \sqrt{\frac{(\vec{X}_{re}(k) - \vec{X}_{re})^2 + (\vec{X}_{im}(k) - \vec{X}_{im})^2}{\vec{X}_{re}^2 + \vec{X}_{im}^2}} = \frac{|\vec{X}_{med}(k) - \vec{X}|}{|\vec{X}|} \quad (4.4)$$

em que $\vec{X}_{re}(k)$ é a parte real do fasor medido no instante k , $\vec{X}_{im}(k)$ é a parte imaginária do fasor medido no instante k , \vec{X}_{re} e \vec{X}_{im} são a parte real e imaginária respectivamente de um fasor de referência.

O sincrofasor medido pode apresentar diferenças nos valores tanto da magnitude quanto da fase em relação ao valor teórico esperado para a grandeza, que podem ser definidos de maneira separada, entretanto na norma do IEEE o critério TVE procura englobá-los em um só indicador. Desta forma, o TVE é capaz de representar qualquer diferença que possa ocorrer tanto nos valores da magnitude como da fase dos fasores medidos em um só valor numérico que é utilizado para a calibração e aferição das unidades de medição (Martin et al., 2008). Os equipamentos que cumprem o critério de qualidade da medição caso apresentem erro fornecerão um sincrofasor que pode apresentar um valor de fase e/ou de amplitude diferente em relação ao que realmente está sendo medido, mas garante-se que essa diferença será menor que o valor estabelecido pela norma.

A Figura 4.3 ilustra esse fato, em que é possível observar o fasor teórico e uma região representando as possíveis localizações das extremidades dos sincrofasores medidos respeitando o critério.

Assim, para que uma medida respeite o critério TVE é preciso que a diferença entre a extremidade do fasor medido e a extremidade do fasor teórico esperado seja no máximo ϵ e a diferença de fase seja no máximo $\Delta\theta$. Por exemplo considerando um fasor com magnitude de 1 p.u., e $\epsilon \leq 1\%$, então o maior valor para $\Delta\theta$ será $\frac{0,01 \cdot 180}{\pi}$ que é aproximadamente 0,573 graus. No caso geral supondo que não haja erro no valor da magnitude do fasor, o valor de $\Delta\theta$ será $\frac{0,01 \cdot 180}{\pi|X|}$.

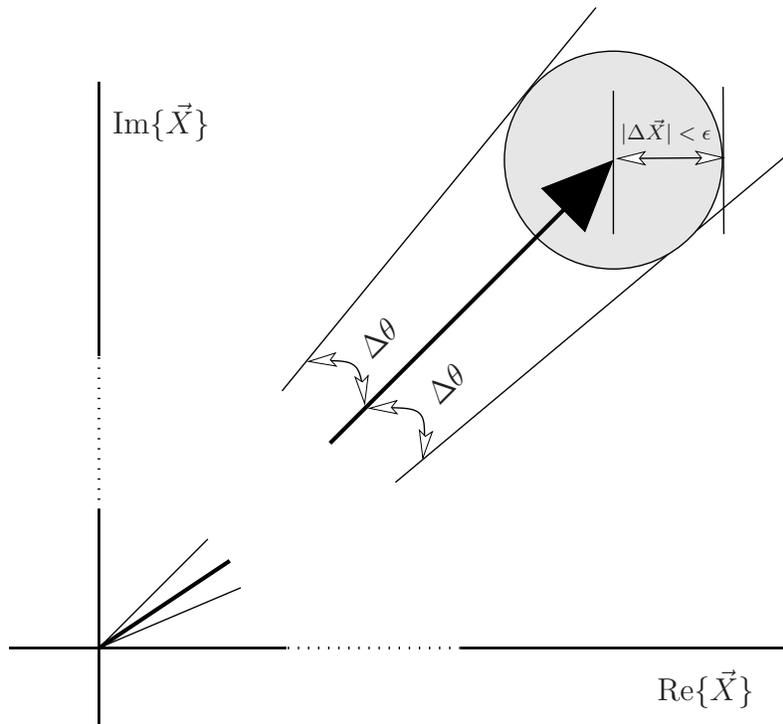


Figura 4.3: Ilustração do critério TVE

Diversos trabalhos na literatura investigaram o critério estabelecido pela norma de 2005 (Yang et al., 2010, Lixia et al., 2010), cujos resultados possibilitaram grandes avanços para a normalização de critérios de qualidade e a eliminação de alguns pontos ambíguos entre as definições do critério e das especificações dos dispositivos que já estavam sendo comercializados. Em 2011 o IEEE revisou a norma (IEEE Power Engineering Society, 2011a), cujos pontos mais relevantes serão brevemente descritos.

Nas referências (Macii et al., 2011) e (Macii et al., 2012) os autores analisaram o comportamento do critério TVE em situações em que o sinal está fora da frequência nominal. Os autores também analisaram PMUs que possuem estimadores para os fasores baseados em transformadas discretas de Fourier com vários tipos de janelas de amostragem e determinaram expressões ana-

líticas para encontrar as faixas de variação do TVE para os piores cenários quando o sistema encontra-se fora da frequência nominal.

Os resultados obtidos permitiram também o desenvolvimento de uma janela de amostragem que procura minimizar os efeitos de perturbações nos parâmetros do sinal de forma a manter o valor do TVE dentro dos valores recomendados pela norma. A norma também estipula que as unidades de medida devem ser capazes de registrar e fornecer medidas com taxas de atualização que são sub múltiplas da frequência nominal da rede de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Taxas de aquisição de fasores das PMUs requeridas pela norma

Frequência do sistema	50 Hz			60 Hz					
Taxas de aquisição (F_S – frames por segundo)	10	25	50	10	12	15	20	30	60

É importante ressaltar que a norma permite e sugere taxas de aquisição maiores e menores que a faixa apresentada na Tabela 4.1, tanto para o caso de 50 Hz como para o caso de 60 Hz. Além disso, os fabricantes devem permitir que as taxas de aquisição possam ser selecionadas livremente e no caso de taxas de aquisição menores que 10/s as medidas só precisam cumprir os requisitos de medição em regime permanente.

A revisão da norma do IEEE de 2011 estabeleceu classes de desempenho específicas para cada utilização e cada uma com valores específicos para o TVE. Além disso, dependendo da aplicação a que vai se destinar os dados obtidos, a norma prevê valores para o critério e procedimentos diferentes para a aferição da qualidade da medida. As classes de desempenho descritas nas normas são a classe P, que se destina aos equipamentos cuja utilização tem foco principalmente aos sistemas de proteção que demandam respostas rápidas, e a classe M, que diz respeito a equipamentos que podem ter perda de qualidade nas medidas caso sejam afetados por sinais ruidosos na rede. A classe M não requer taxas de aquisição elevadas, sendo a preocupação maior a precisão das medidas em detrimento da rapidez com que as mesmas são obtidas. Além das classes de desempenho, a norma especifica requisitos e procedimentos para a averiguação do atendimento do critério TVE no que diz respeito a medição em regime permanente e para medição de transitórios.

Nesta tese as medidas obtidas pelas PMUs serão utilizadas para avaliar a estabilidade de tensão em regime permanente, sendo assim apenas a parte referente aos valores máximos sugeridos pela norma para o TVE no caso de medição em regime permanente serão reproduzidos e discutidos.

A Tabela 4.2 apresenta os valores máximos que o TVE pode assumir para a medição em regime permanente ao se realizar perturbações em diversos parâmetros de acordo com os procedimentos contidos na norma (IEEE Power Engineering Society, 2011a).

Tabela 4.2: Requisitos para medição em regime permanente de sincrofasores

Parâmetro do sinal a ser perturbado	Condição de Referência	Faixa de valores a serem aplicados à condição de referência e o máximo valor do TVE admissível			
		Classe P		Classe M	
		Faixa	TVE	Faixa	TVE
Frequência	freq. nominal	$\pm 2,0\text{Hz}$	1%	$\pm 2,0\text{Hz p/}$ $F_S < 10$	1%
				$\pm F_S/5 \text{ p/}$ $10 \leq F_S < 25$	
				$\pm 5,0\text{Hz p/}$ $F_S \geq 25$	
A faixa de valores para o teste de frequência devem ser aplicados da seguinte forma $f_0 \pm \Delta f$ e respeitar o critério para três temperaturas: T=ambiente $\approx 23^\circ\text{C}$, T=0°C e T=50°C					
Magnitude da tensão	100% do nominal	80% a 120%	1%	10% a 120%	1%
Magnitude da corrente	100% do nominal	10% a 200%	1%	10% a 200%	1%
Ângulo de fase	Constante ou com variação lenta	$\pm \pi$ rad	1%	$\pm \pi$ rad	1%
Distorção Harmônica, uma frequência por vez	<0,2% DHT Distorção Harmônica Total	1% de cada harmônica até a 50 ^ª	1%	10% de cada harmônica até a 50 ^ª	1%
Interferência com sinal fora da banda de passagem	<0,2% da magnitude do sinal de entrada		não há limite máximo	10% da magnitude do sinal de entrada p/ $F_S \geq 10$	1,3%

A norma descreve que para os testes de averiguação da adequação do equipamento à norma para a medição em regime permanente, todos os parâmetros do sinal de referência devem estar fixos nos valores estipulados que caracterizem a condição de regime permanente, com exceção do parâmetro a ser perturbado em cada verificação contida na Tabela 4.2. Desta forma ao se aferir o equipamento quanto a variação do valor da frequência, a amplitude do sinal, o valor da fase, a distorção harmônica e qualquer interferência no sinal devem estar fixos ou serem nulos no caso da distorção harmônica e do sinal de interferência.

Para se obter um sinal com variação lenta no teste de ângulo de fase, a norma cita que é possível utilizar um sinal com frequência f_{in} diferente da frequência nominal f_0 desde que $|f_{in} - f_0| < 0,25\text{Hz}$ para evitar efeitos indesejados em outros parâmetros no teste.

O teste de interferência com sinal fora da banda de passagem referido na tabela de máximos valores de TVE é realizado para cada uma das taxas de aquisição do equipamento F_S , o sinal possui uma frequência definida de acordo com a banda de passagem para cada valor de F_S . A banda de passagem para cada valor de F_S é definida como $|f - f_0| < F_S/2$, portanto a frequência do sinal de interferência deve ser tal que $|f - f_0| \geq F_S/2$.

A banda de passagem foi definida desta forma pois o objetivo do teste era avaliar a eficácia dos filtros *anti-alias* da PMU, pois para uma dada taxa de aquisição F_S , um sinal com frequência maior que $F_S/2$ vai exceder o limite da taxa de Nyquist o que resultará em sobreposições dos espectros de frequência dos sinais obtidos pelo medidor.

A norma também ressalta que para o teste de interferência é possível utilizar um sinal senoidal na frequência a ser testada somada ao sinal da rede da mesma sequência a ser testada (positiva ou negativa) com a magnitude estabelecida pela tabela e sugere que a faixa de frequências testada seja de 10Hz até a segunda harmônica ($2f_0$).

A referência (Kamwa et al., 2012) analisou os procedimentos e critérios descritos na última revisão da norma (IEEE Power Engineering Society, 2011a), que estipulou pela primeira vez valores para os critérios de desempenho dinâmico no que diz respeito o projeto do filtro utilizado para a estimação dos fasores. Um dos focos do trabalho se concentrou na verificação da qualidade dos medidores que respeitam os novos critérios introduzidos pela norma para o uso em PSS (*Power System Stabilizers*) no cenário das WAMPACs. Os testes foram comparados com dados de PSSs da Hydro-Québec e os autores chegaram a conclusão que para aplicações de PMUs em PSS os valores definidos pela norma não se mostraram adequados.

Para a averiguação da qualidade da medição da frequência e do ROCOF também existem critérios a serem respeitados descritos na norma com seus respectivos valores, entretanto seus valores e suas descrições serão omitidos uma vez que não apresentam relevância significativa no estudo de estabilidade de tensão em regime permanente realizado nesta tese.

4.5 Monitoramento da Margem de Estabilidade Utilizando PMUs

Com o advento da tecnologia da medição sincronizada, criou-se a possibilidade de obter medidas mais precisas e mesmo medidas que com os equipamentos de medição anteriores não era possível de se obter diretamente, como por exemplo o ângulo de fase das tensões e correntes.

Na literatura muitos trabalhos exploraram as novas possibilidades de medidas provenientes da medição sincronizada para lidar com o problema de estabilidade de tensão, entre eles pode-se citar (Xu et al., 2005) que utilizou modelos auto regressivos adaptativos e as medidas de PMUs para monitorar a estabilidade de tensão local baseada em um equivalente da rede.

(Taylor et al., 2005) apresenta uma interessante análise a respeito das novas possibilidades que surgiram com a nova tecnologia de medição sincronizada para o controle e manutenção da estabilidade de tensão dentro do contexto da WACS (*Wide Area Stability and Voltage Control System*).

Seguindo a mesma linha de raciocínio, o trabalho (Kamwa et al., 2007) utilizou os conceitos de um sistema WAMS (*Wide Area Monitoring System*) baseado em medidas de PMUs para estudar o monitoramento da estabilidade transitória do sistema, desenvolvendo índices e rastreando os modos do sistema.

A referência (Tiwari & Ajarapu, 2007) apresenta uma interessante combinação entre o estudo de estabilidade de tensão, avaliação de segurança e qualidade de energia. Neste artigo os autores desenvolveram uma estratégia para identificar as contingências que poderiam representar maiores riscos para o problema de colapso de tensão utilizando dados de PMUs. Os autores necessitam de um processo para filtrar as contingências baseado em um índice de severidade calculado para cada caso para classificá-las.

Uma outra maneira de se avaliar a estabilidade de tensão em regime permanente é pelo rastreamento do valor da margem de estabilidade de tensão. Esta abordagem foi adotada por muitos trabalhos presentes na literatura e requer estratégias para contornar o problema do esforço computacional.

Alguns trabalhos na literatura procuram determinar a margem de estabilidade de tensão usando informações de um banco de dados existente aliado a medidas em tempo real do sistema. Em (Garcia-Valle et al., 2009) uma ferramenta estatística foi aplicada de forma a estimar a margem de estabilidade de tensão em regime permanente utilizando medidas das PMUs.

As referências (Nakawiro & Erlich, 2008) e (Zhou et al., 2010) utilizaram redes neurais artificiais, do inglês ANN (*Artificial Neural Network*). Na primeira referência a ANN é utilizada para estimar o valor de vários índices para a margem, na segunda referência, o valor da margem é estimado diretamente obtendo um bom resultado além da determinação do número mínimo de unidades de medida e suas respectivas localizações baseado em simulações exaustivas com a ferramenta.

A maior parte dos métodos propostos na literatura requerem um grande esforço computacional, sendo portanto inadequados para aplicações em tempo real. É possível encontrar algumas alternativas mais rápidas para lidar com o problema, entretanto as mesmas necessitam de um excesso de simplificações no modelo do sistema (Corsi & Taranto, 2008).

Na referência (Liu et al., 2008) foi proposto um modelo equivalente utilizando as medidas obtidas pelas PMUs para avaliar a estabilidade de tensão em corredores de transmissão. Os parâmetros do modelo são obtidos pelo método de Newton de mínimos quadrados nas medidas e o monitoramento da estabilidade é feito pela máxima capacidade de transferência do corredor, que segundo os autores é igual à margem de estabilidade de tensão.

Além disso, com os recentes avanços em medição fasorial sincronizada e em telecomunicações (Martin et al., 2008, Moraes et al., 2008), tornou-se viável a utilização das medidas fornecidas por esses equipamentos nos estudos. Uma vez que se possui medidas precisas e em tempo real, é possível obter uma perspectiva mais fiel do sistema em comparação com o sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), além do fato de não haver mais a restrição da distância geográfica entre os medidores e a possibilidade de se ter a medida da fase dos fasores de tensão nas barras.

Além das aplicações já citadas para a tecnologia de PMUs, a referência (Wen et al., 2010)

apresenta uma interessante aplicação de PMUs para a estimação de faltas dinâmicas em linhas de transmissão, colocando em evidência a importância para o setor elétrico desta nova tecnologia em termos de novas aplicações e possibilidades de análise advindas da medição sincronizada.

O próximo capítulo apresenta o detalhamento de uma ferramenta de estimação do valor da margem utilizando as medidas das PMUs que não se baseia em equivalentes ou simplificações dos modelos do sistema, além de duas estratégias para a alocação das PMUS com o intuito de melhorar a estimação do valor da margem.

Capítulo 5

Metodologia Proposta para a estimação da MET

5.1 Introdução

O problema de monitoramento da estabilidade de tensão em regime permanente pode se beneficiar muito do desenvolvimento da medição sincronizada nos sistemas elétricos de potência, sobretudo no que se refere ao monitoramento em tempo real. A possibilidade de sincronizar as medidas com o relógio atômico do sistema GPS fornece medidas com um grau de precisão muito maior e também medidas que antes só poderiam ser estimadas ou obtidas indiretamente, como por exemplo o valor das fases dos fasores.

Dentro do contexto de monitoramento da estabilidade de tensão em regime permanente uma abordagem bastante interessante e que sofreu grandes avanços ao utilizar os novos tipos de medidas foi a do monitoramento da margem de estabilidade de tensão.

Uma grande preocupação no monitoramento da margem é o custo computacional elevado para o cálculo da mesma. Muitos autores trabalharam no sentido de encontrar maneiras de estimar a margem rapidamente, como por exemplo (Jimenez & Castro, 2005), que utilizou diversas medidas do sistema como as magnitudes de tensão, as potências ativas e reativas, os fluxos nas linhas e as perdas para treinar uma rede neural artificial para estimar a margem de estabilidade de tensão.

Para detectar os pontos de colapso de tensão os autores utilizaram um índice baseado em vetores tangente. Além disso, para reduzir o número de entradas do modelo, foi utilizada a téc-

nica PCA (*Principal Component Analysis*) com o intuito de reduzir o esforço computacional da estimação e acelerar o processo. Os dados utilizados consideraram diversos cenários de carregamento e contingências e os autores concluíram que apesar de o método no estágio em que estava apresentado ainda não estar pronto para ser utilizado em um centro de controle devido a erros significativos na estimação em alguns casos, o conceito se mostrou promissor.

A referência (Torres et al., 2007) apresenta um interessante trabalho em que propõe um método de estimação da margem de estabilidade de tensão, utilizando sistemas de inferência *Fuzzy* baseados em redes neurais artificiais **ANFIS** (*Artificial Neural Fuzzy Inference System*), tendo como entrada de dados vários índices de estabilidade de tensão, bem como os índices baseados em sensibilidade, ambos acima citados. Uma técnica de *clustering* subtrativo foi utilizada para a seleção dos modelos *fuzzy* e redes neurais adaptativas foram utilizadas para calibrar os mesmos de forma a melhorar a precisão da estimativa da margem.

As referências (Leonardi & Ajjarapu, 2010) e (Leonardi et al., 2010) apresentaram uma abordagem para o problema de monitoramento da margem de estabilidade de tensão em tempo real que utiliza modelos de regressão multilíneares estatísticos acrescido de técnicas de aprendizado de máquinas (*machine learning*). Os modelos relacionam o comportamento da margem com as reservas de reativos do sistema e, utilizando um banco de dados com diversos cenários de carregamento e contingências, o método encontrou um modelo para essa relação por regressões lineares.

Apesar de não utilizar as medidas das PMUs, as referências citadas acima colocaram em evidência o fato que é possível utilizar diversas abordagens e técnicas para tentar encontrar uma relação entre algum indicador da situação da estabilidade de tensão em regime permanente e dados ou medidas provenientes da rede.

Apesar de existirem muitos trabalhos no assunto, esta tese procura trazer um novo enfoque ao estudo do problema no sentido de não necessitar recorrer a equivalentes ou simplificações nos modelos do sistema no que concerne a estabilidade de tensão em regime permanente, não utilizando índices para avaliar a estabilidade de tensão, e sim o cálculo direto da MET em regime permanente *off-line*, além de propor duas estratégias de alocação de PMUs.

A ferramenta utiliza modelos auto-regressivos lineares e não lineares que têm como entrada as magnitudes e ângulos dos fasores das tensões das barras em que estão instaladas as PMUs e obtêm como saída um valor estimado para a margem de estabilidade de tensão para a situação em que o sistema se encontra.

5.2 Modelo do sistema

As referências (Da Silva et al., 2001), (Kopcak et al., 2007) e (Kopcak, 2007) apresentam um interessante método para a análise da estabilidade de tensão, utilizando modelos estáticos do fluxo de carga, que permite incorporar ao modelo informação do modelo dinâmico de forma que seja possível estudar o problema do ponto de vista estático, observando o comportamento do sistema em regime permanente em um conjunto de pontos de equilíbrio ao se variar o fator de carregamento. O método consiste em encontrar a solução para o sistema algébrico diferencial de equações que representam a dinâmica do sistema e o conjunto de equações de fluxo de carga, para vários valores do fator de carregamento. As soluções são obtidas por um processo iterativo denominado Método de Newton Expandido.

No método de Newton expandido o sistema algébrico diferencial não linear é substituído por um sistema algébrico não linear, no qual se considera que o sistema possui uma solução de equilíbrio estático em regime permanente no qual as derivadas $\dot{x}(t)$ são nulas resultando no seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, u) \\ \mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, u) \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, u) \\ \mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, u) \end{bmatrix}$$

Uma das grandes vantagens deste método é o fato de que o limite de estabilidade de tensão pode ser obtido com uma maior precisão quando se tem disponível informações a respeito do modelo dinâmico dos equipamentos contidos no sistema, além de requerer um esforço computacional muito menor uma vez que não é necessário técnicas de integração não lineares.

A referência (Ning et al., 2006) utilizou esta metodologia considerando um modelo dinâmico mais completo do sistema, obtendo bons resultados no estudo de estabilidade de tensão, validando os resultados por simulações no domínio do tempo.

Para os estudos realizados nesta tese, optou-se por utilizar apenas o modelo estático constituído pelas equações de fluxo de carga, considerando os limites de potência reativa dos controles de tensão dos geradores nas barras PV.

Em primeiro lugar, para a utilização do modelo expandido do sistema, seria necessário o conhecimento de dados do modelo dinâmico das máquinas primárias, do sistema de excitação e do controle de todos os geradores do sistema. Em segundo lugar para a estratégia de alocação de

PMUs que utiliza o fator de participação ativo e reativo seria necessário o desenvolvimento de um fator de participação que considerasse em sua formulação o modelo expandido do fluxo de carga e não somente a submatriz referente ao modelo em regime permanente.

Com relação à utilização do modelo de fluxo de carga expandido no problema de monitoramento da estabilidade de tensão, a referência (Long & Ajjarapu, 1999) propôs uma técnica de cálculo de sensibilidades dos parâmetros do sistema que mais afetam a estabilidade de tensão utilizando um modelo muito similar ao modelo expandido, entretanto não se tem conhecimento sobre a existência de um fator de participação baseado neste modelo.

Um outro fator que foi levado em consideração na escolha do modelo do sistema foi o fato de o método proposto nesta tese não ter uma forte dependência do modelo utilizado para a formação do banco de dados utilizado, sendo portanto possível utilizar modelos mais próximos da realidade para a obtenção dos dados de entrada para o algoritmo de estimação, caso dados mais completos a respeito dos equipamentos estejam acessíveis.

Dessa forma o modelo utilizado para representar o sistema pode ser mais ou menos detalhado, de acordo com a disponibilidade de parâmetros e interesse de análise, no caso de se analisar a estabilidade de tensão em regime permanente tanto o modelo Newton expandido como o Newton clássico seriam adequados.

Além disso para a realização dos testes e obtenção dos resultados, utilizou-se uma rede de transmissão em que a informação a respeito da geração em cada barra representava na verdade um aglomerado de máquinas e não equipamentos individuais, contendo apenas a informação dos limites de reativos das barras com controle de tensão.

Para o caso do fluxo de carga estático o sistema de equações se reduz a

$$0 = \mathbf{G}(\mathbf{X}, u)$$

Para a obtenção de resultados da implementação do método, foi utilizado o sistema teste do IEEE denominado *Newengland* que possui 39 barras e 10 geradores, cujo diagrama unifilar pode ser visto na Figura 5.1

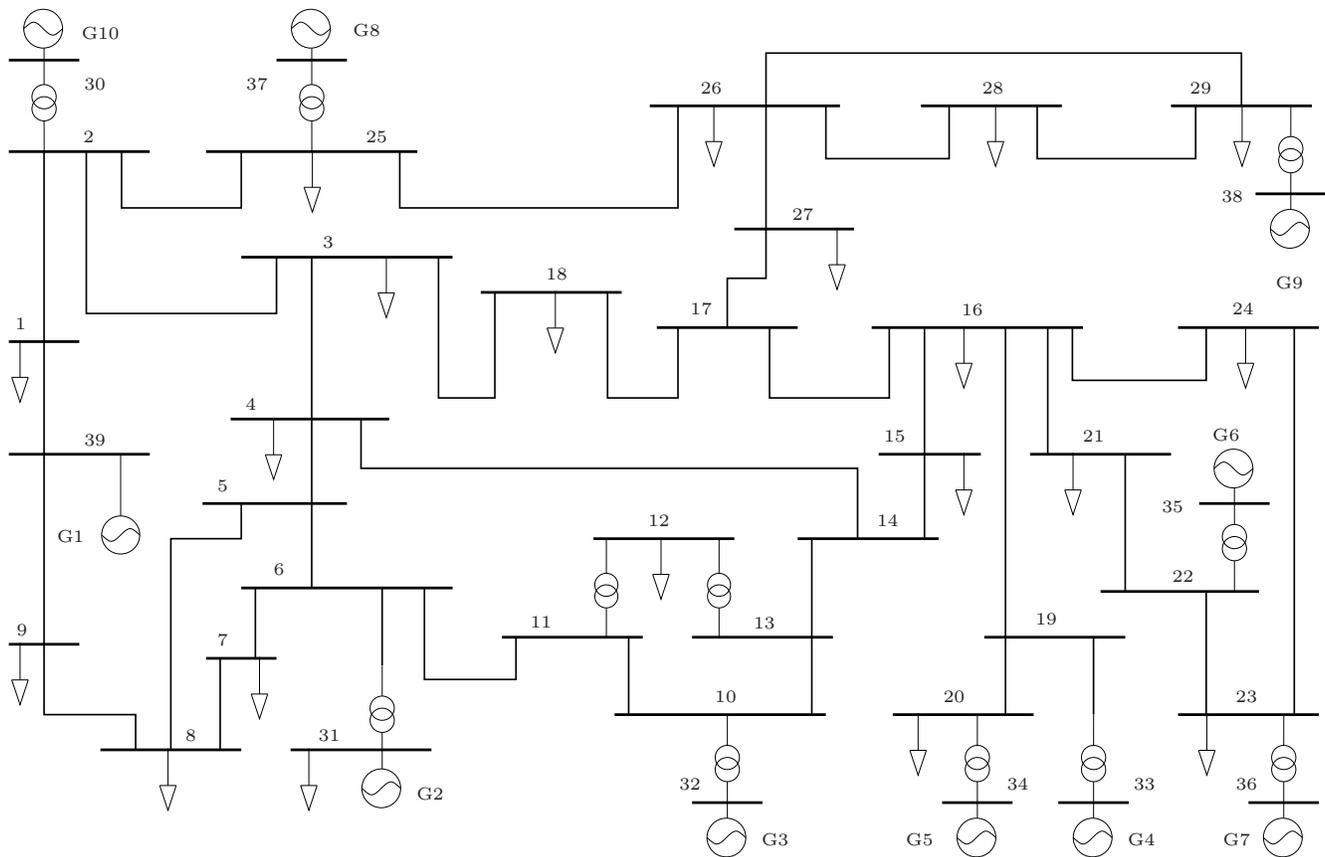


Figura 5.1: Diagrama unifilar do sistema New England de 39 barras

5.3 Modelo do Estimador

A utilização de identificação de sistemas para o problema de estabilidade de tensão foi utilizada por (Ghasemi et al., 2004) em que técnicas de identificação de sistemas foram utilizadas para identificar os modos do modelo linearizado do sistema dinâmico de forma a ser possível monitorar quando a parte real do menor autovalor se anula ao se variar o parâmetro utilizado em análises de bifurcação.

O ponto interessante desta aplicação de identificação de sistemas é que os autores utilizaram um modelo auto regressivo para estimar parâmetros de um modelo dinâmico linearizado e obter assim, os modos do sistema linearizado, enquanto que no trabalho desenvolvido nesta tese a ideia é utilizar técnicas de identificação de sistemas para obter um modelo que relacione diretamente as medidas de grandezas do sistema com o valor da margem de estabilidade de tensão.

Além disso, pode-se citar uma outra diferença entre a metodologia acima citada e a empregada nesta tese, que é o fato de o tipo de estabilidade estudada na referência citada ser dinâmica e relacionada com bifurcações sela-nó SNB (*Saddle-Node Bifurcations*), bifurcações induzidas por limites LIB (*Limit Induced Bifurcations*) e bifurcações de Hopf HB (*Hopf Bifurcations*).

A estratégia de utilizar técnicas de identificação de sistemas para a estimação da margem de estabilidade de tensão em regime permanente já foi utilizada nas referências (Repo et al., 2000) e (Repo et al., 2002), entretanto apenas para o caso do modelo do estimador do tipo linear, sendo que para o caso do estimador não linear vários tipos de redes neurais foram utilizados. Além disso, os autores consideraram que os dados utilizados para alimentar o modelo seriam provenientes apenas do sistema SCADA, desta forma, as medidas consideradas no trabalho citado para o cálculo dos parâmetros do modelo foram as magnitudes das tensões e os fluxos de potência em algumas linhas. Além disso, os autores desenvolveram um algoritmo de detecção e escolha entre os diversos modelos calculados necessitando nesse caso de informações a respeito da topologia da rede.

Mais recentemente (Zhou et al., 2010) utilizou técnicas de redes neurais artificiais (ANN) para determinar a relação entre diversos tipos de medidas de grandezas da rede com a margem de estabilidade de tensão, considerando quatro possíveis conjuntos de medidas, somente as magnitudes das tensões, as injeções líquidas de potência ativa e reativa nas barras, as magnitudes das tensões e as injeções de potência reativa e as magnitudes e ângulos das fases das tensões. Os autores também consideraram a ocorrência de erros nos valores das medidas das PMUs respeitando o critério $TVE \leq 1\%$ e encontraram uma estratégia de alocação das PMUs utilizando um algoritmo de busca sub ótima chamado SFS (*Sequential Forward Selection*), que procura a melhor posição para as unidades de medida considerando um conjunto pré estabelecido de características da rede neural.

O interesse nos trabalhos citados acima reside no fato de os mesmos utilizarem técnicas alternativas para o monitoramento da margem de estabilidade de tensão que sejam computacionalmente eficientes e, portanto, possam ser utilizadas em implementações em tempo real nos centros de controle.

O foco desta tese se concentra na análise da possibilidade de utilizar as técnicas de identificação de sistemas de maneira similar aos trabalhos em (Repo et al., 2000) e (Repo et al., 2002), mas considerando dados mais precisos e de natureza diferente fornecidos pelas PMUs, como por exemplo as fases das tensões, além de propor um algoritmo alternativo ao proposto em (Zhou et al., 2010)

de alocação de PMUs que não necessariamente é ótimo, mas que não necessite de buscas exaustivas que utilizam os resultados do próprio estimador.

5.3.1 Detalhes da construção do banco de dados

A construção do banco de dados foi realizada por sucessivas soluções de fluxos de carga utilizando o método de Newton. Uma curva diária de carga minuto a minuto foi utilizada e para cada ponto uma curva PV do sistema era construída resolvendo-se diversos fluxos de carga, até que o ponto de máximo carregamento do sistema fosse atingido e a margem de estabilidade de tensão fosse obtida.

Além disso, para aumentar a gama de cenários possíveis, os pontos da curva de carga a cada dia sofriam dois tipos de alteração aleatória.

- Os valores dos carregamentos da curva diária de carga eram alterados em 2% de seu valor original a cada dia de forma aleatória, desta forma, a curva em um dos dias tinha um deslocamento aleatório de 2% em relação ao outro.
- Contingências do tipo simples (N-1) não simultâneas, como por exemplo a saída de uma linha de transmissão, transformador ou de um gerador do sistema, ocorria em instantes aleatórios, em um equipamento escolhido aleatoriamente e com uma duração cujo valor é definido aleatoriamente em cada dia.

Utilizando esta estratégia, produziu-se 50 dias com os mais diversos valores de carregamento e contingências, em que se utilizou o método de Newton para o cálculo de fluxos de potência e construção de curvas PV. Cada dia possui uma curva de carga com 1441 pontos, considerando 49 dias para o banco de dados e o último dia reservado para validação do método, tem-se 70609 pontos.

Em cada um desses pontos, uma curva PV foi construída com um passo de incremento no carregamento da ordem de $1 \cdot 10^{-3}$, o que correspondeu para os cenários criados a algo em torno de milhões de fluxos de carga apenas para montar o banco de dados. O banco de dados utilizado continha os fasores das tensões nas barras para cada caso das curvas de carga, no caso base, ou seja, sem incrementos para a construção da curva PV, além dos valores das margens obtidas. Como

critério de parada para o cálculo da curva PV e obtenção da margem, considerou-se o ponto de máximo carregamento como sendo o ponto em que o método de Newton não mais convergia após 30 iterações, que o controle de limites de reativos só era ativado quando o máximo *mismatche* de potência era menor que 10 vezes a tolerância. Além disso nos casos em que ocorria uma contingência, tentava-se uma segunda vez com a mesma contingência com um grau de severidade menor, por exemplo, em contingências de linha considerava-se que a mesma era composta de mais condutores e o aumento em sua impedância era reduzido.

A aplicação do método de estimação da margem consistiu em considerar o banco de dados formado pelas magnitudes e fases das tensões das barras e das margens de estabilidade de tensão calculadas para cada ponto da curva diária como entradas e saídas, respectivamente, de um sistema dinâmico cujos parâmetros poderiam ser estimados.

Na metodologia utilizada nesta tese, utilizou-se o modelo do tipo ARX considerando que o sinal de entrada é composto pelos valores das magnitudes das tensões e dos ângulos das tensões das barras do sistema monitoradas pelas unidades PMUs, bem como da estimativa da margem anteriormente obtida pela análise do banco de dados.

O método de estimação dos parâmetros do tipo auto-regressivo foi escolhido pois considerando-se que cada um dos valores do banco de dados é uma amostra de leitura das unidades de medição, a simulação representa a operação do método de estimação da margem operando sobre as leituras obtidas pelas unidades de medição.

Assim, no centro de operação pode-se ter um programa que condiciona os dados das leituras das PMUs e utiliza os parâmetros calculados com o banco de dados para realizar operações rápidas e estimar o valor da margem.

Além disso, a estrutura desse tipo de estimador permite atualizar o banco de dados periodicamente e recalculer os parâmetros do estimador para ser usado em tempo real, adicionalmente por apresentar uma estrutura semelhante a um filtro discreto aplicado em uma equação a diferenças, o modelo necessita de apenas alguns valores iniciais para começar, para então utilizar os próprios valores estimados de margem para prosseguir.

Na aplicação do método foi considerado que o sinal de ruído na equação (3.5) é do tipo branco, assim utilizando o algoritmo do MATLAB para o cálculo dos polinômios $A(q)$ e $B(q)$ consegue-se

obter os coeficientes do modelo. Os seguintes vetores e matrizes foram utilizados no modelo ARX:

$$u(k)_{N,J} = \begin{bmatrix} \bar{V}_1(k) & \bar{V}_1(k-1) & \cdots & \bar{V}_1(1) \\ \bar{V}_2(k) & \bar{V}_2(k-1) & \cdots & \bar{V}_2(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{V}_b(k) & \bar{V}_b(k-1) & \cdots & \bar{V}_b(1) \\ \bar{T}_1(k) & \bar{T}_1(k-1) & \cdots & \bar{T}_1(1) \\ \bar{T}_2(k) & \bar{T}_2(k-1) & \cdots & \bar{T}_2(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{T}_b(k) & \bar{T}_b(k-1) & \cdots & \bar{T}_b(1) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$y(k) = [MET(k-1)MET(k-2)\cdots MET(1)] \quad (5.2)$$

onde:

- $N = 2b + 1$ número de linhas de $u(k)$
- J número de amostras do banco de dados e número de colunas de $u(k)$
- b número de barras com unidades de medição
- k índice da amostra atual
- MET margem de estabilidade de tensão estimada

Levando-nos ao modelo ARX que relaciona as magnitudes e ângulos das tensões nas barras com o valor da margem. A equação do modelo está reproduzida novamente abaixo para maior clareza para o caso do estimador linear:

$$\mathbf{A}(q)y(k) = \mathbf{B}(q)u(k) + \nu(k) \quad (5.3)$$

e para o caso do estimador não linear

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_k-n_b+1)) \quad (5.4)$$

No caso de estimação da margem, o vetor de entrada compreende vários sinais de entrada no instante de amostragem k , que corresponde às leituras de magnitude e fase das tensões das

barras em que se tem instalada uma unidade de medida. Dessa forma temos uma quantidade de coeficientes a determinar para cada sinal de entrada em função da ordem dos polinômios.

Uma vez obtidos os coeficientes dos polinômios $A(q)$ e $B(q)$, a obtenção dos valores da estimativa da margem calculada com base nos valores estimados anteriormente e nos valores das leituras das unidades de medida fasoriais é realizada multiplicando-se adequadamente os vetores de entrada e os valores de margem estimados anteriormente pelos polinômios. O índice q dos polinômios contém a informação sobre qual termo da série de medidas devemos multiplicar o coeficiente relacionado com o índice q . Assim se for considerado o i -ésimo coeficiente q do polinômio $B(q)$, o mesmo deverá ser multiplicado pelo elemento $(k - i)$ do vetor de entrada.

A Figura 5.2 apresenta um exemplo de uma das curvas de carga diária e a respectiva curva das margens calculadas para o sistema *Newengland*, em que é possível notar uma característica típica de cargas residenciais com um pico no começo da noite, a margem como era de se esperar é maior nos períodos de baixo carregamento e menor nos períodos de alto carregamento. É possível notar também na figura diminuições súbitas no valor da margem devido às contingências que estão ocorrendo ao longo do dia. Esta curva de carga foi escolhida pois apesar de não ter características muito semelhantes as das curvas de sistemas de transmissão, refletiriam melhor o comportamento do método quando submetido à condições extremas de carregamento.

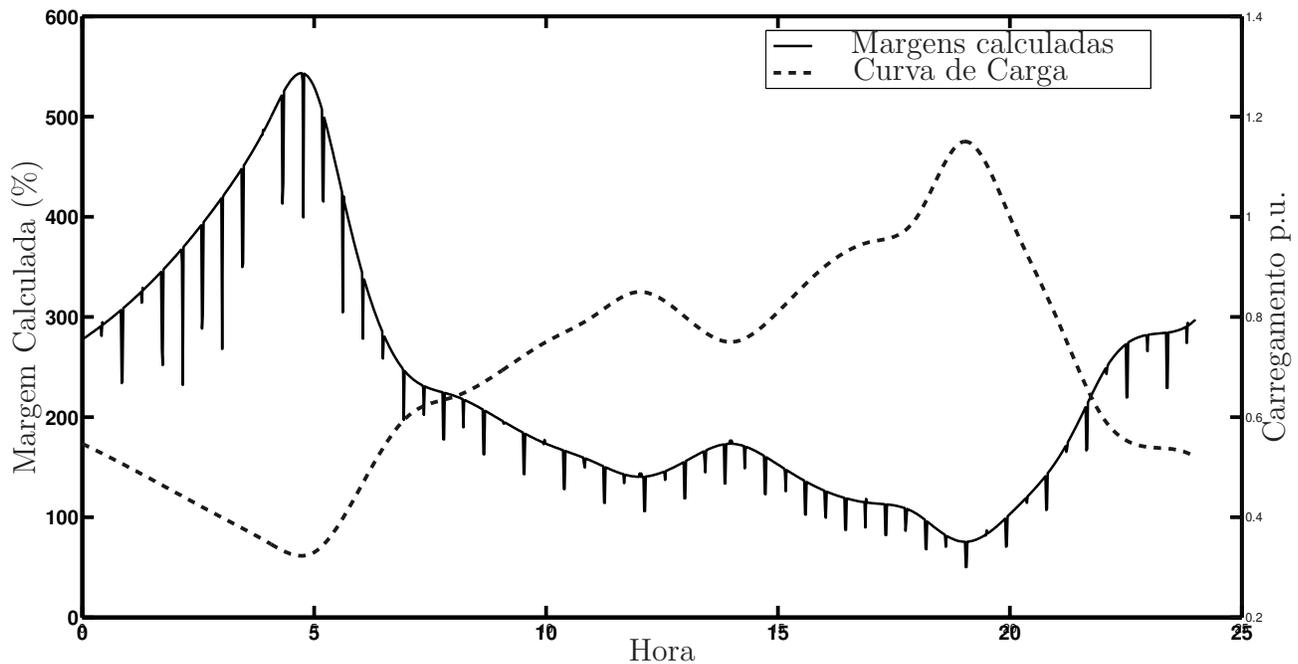


Figura 5.2: Exemplo de uma curva diária de carga e as respectivas margens

Uma amostra de 10 dias de registros de margens no banco de dados pode ser vista na Figura 5.3. Pode se notar as diferenças que ocorrem com os valores das margens em cada dia, devido a variação aleatória dos parâmetros que produziram os dados mencionadas anteriormente.

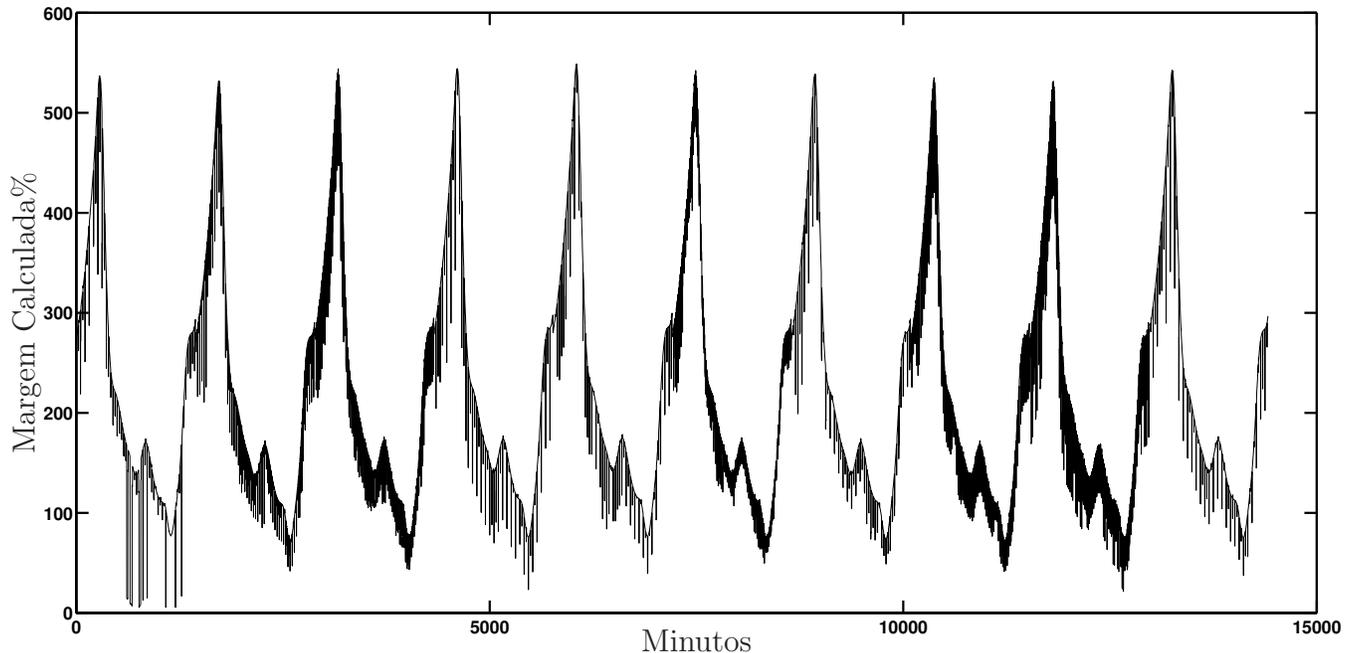


Figura 5.3: Amostra de 10 dias contido no banco de dados.

5.4 Resultados da aplicação do modelo de estimação

Os primeiros testes realizados consideraram toda a massa de dados contida no banco de dados e apenas um modelo linear e outro não linear foram utilizados para estimar as margens para o 50º dia, supondo-se que as PMUs estavam instaladas em todas as barras em que a tensão não era controlada (barras PQ).

Os resultados da aplicação do modelo linear obtido pode ser visto no gráfico da Figura 5.4, em que no eixo das abscissas estão os horários do dia utilizado para a validação do modelo, e no eixo das ordenadas os valores das margens percentuais em relação ao valor do caso base. Durante os testes de implementação do método, notou-se que o comportamento da tensão frente a contingências no sistema diferia em função do patamar de carga ao qual o sistema estava sujeito.

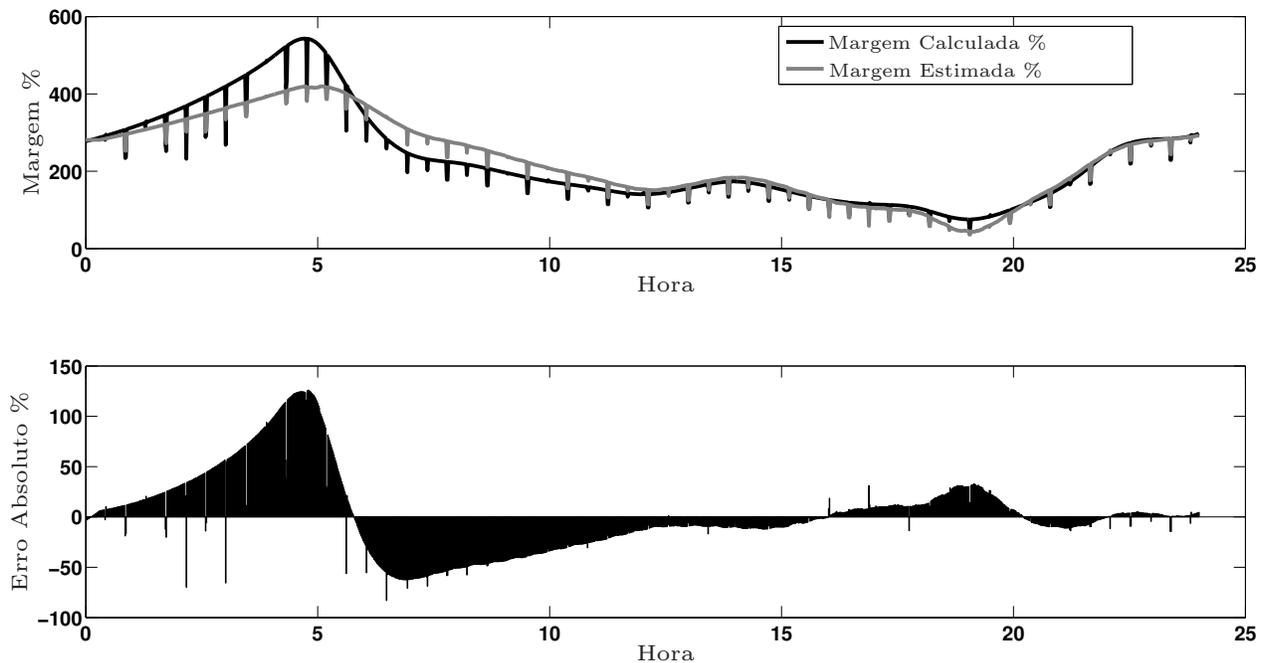


Figura 5.4: Resultados considerando um modelo linear para toda a curva de carga.

Desta forma, dividiu-se o modelo de estimação de acordo com o patamar de carga do sistema de modo a tentar melhorar a precisão do método principalmente na região de baixo carregamento. Por exemplo nos horários em que a demanda está mais baixa e a margem tem os valores mais elevados, as variações das tensões são menores quando comparadas às variações nos outros períodos em resposta a perturbações nas potências e na topologia da rede.

Uma vantagem na divisão de modelos por patamar de carga é o fato de ser possível ajustar parâmetros individuais de um modelo para uma região da curva de carga sem prejudicar a qualidade do modelo de outra região. Por exemplo, no caso do estimador utilizando modelo linear ARX, as ordens dos polinômios para as regiões de carga leve, média e pesada foram ajustados de forma a obter o menor erro de estimação. Desta forma, o método procura encontrar os valores dos parâmetros para três modelos de estimação da margem, uma para cada patamar de carga considerado, a saber, patamar de carga leve, carga média e carga pesada.

A Tabela 5.1 detalha a divisão dos patamares de carga da curva diária utilizada para separar os modelos estimados. O parâmetro λ é o valor utilizado para aumentar ou diminuir o carregamento do sistema. No estudo realizado, foi considerado um cenário em que todas as cargas do sistema aumentavam na mesma proporção e com fator de potência constante, assim, o parâmetro λ foi multiplicado a todas as cargas ativas e reativas do sistema, bem como à geração do sistema de

forma a acompanhar a carga.

Tabela 5.1: Divisão em patamares da curva diária.

Patamar	Fator de carga	Horário
Carga leve	$\lambda < 0,5499$	entre 22:40hs e 6:30hs
Carga Média	$0,5522 < \lambda < 0,7500$	entre 6:30hs e 14:00hs
	$0,5506 < \lambda < 0,7529$	entre 21:20hs e 22:40hs
Carga pesada	$0,7501 < \lambda$	entre 14:00hs e 21:20hs

Considerando a divisão da curva de carga dada na Tabela 5.1 e um banco de dados de 49 curvas de carga diárias com uma variação aleatória de 2% em torno de uma curva inicial, um modelo linear do tipo ARX foi estimado para cada patamar de carga. Cada curva contemplava diferentes cenários de contingências, também gerados aleatoriamente e os três modelos resultantes foram validados utilizando uma curva de carga com padrão de carregamento e cenário de contingências diferente dos utilizados na construção do banco de dados. Apesar de a divisão em patamares de carga resultar num aumento no número de modelos a serem utilizados, para cada região da curva de carga, apenas um dos modelos é utilizado de cada vez, além disso o número de modelos se limita ao número de divisões da curva de carga considerado.

5.4.1 Resultados com PMUs alocadas em todas as barras PQ

O gráfico da Figura 5.5 apresenta o resultado da validação do modelo, considerando que as PMUs estão instaladas em todas as barras do sistema. Nota-se que a estimativa para os patamares de carga leve e de carga média não apresentaram resultados satisfatórios. Em compensação nos períodos de carga pesada em que a margem de estabilidade apresenta valores menores, e que conseqüentemente é a região de maior interesse para a aplicação da ferramenta, a estimativa se mostrou mais precisa. Destaca-se que é apresentado o erro absoluto, ou seja, a diferença direta entre o valor da margem calculada pela curva PV e a estimada pelo método.

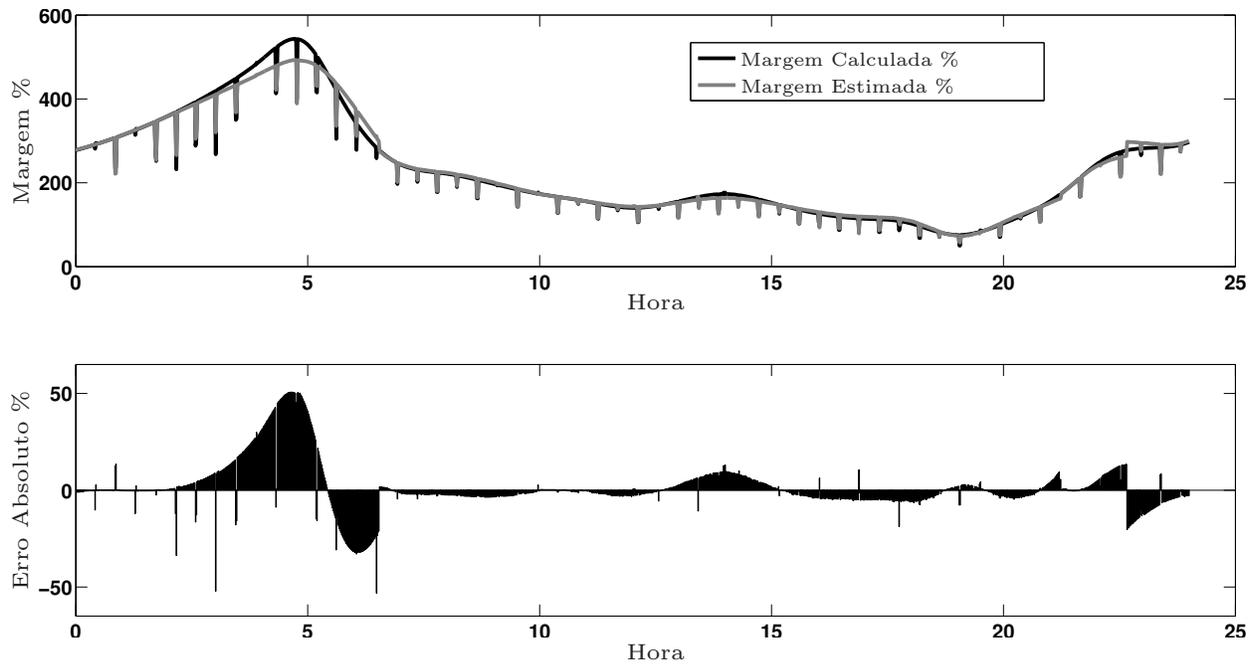


Figura 5.5: Margem Estimada e Calculada - Modelo Linear

A Figura 5.6 apresenta os resultados da estimação da margem utilizando o modelo não linear considerando as mesmas condições utilizadas para o caso com o modelo linear. Neste caso é possível notar que o modelo não linear apresentou resultados melhores quando comparados aos do modelo linear, principalmente no patamar de carga pesada. Um fato relevante a ser destacado é que os picos presentes nos erros absolutos coincidem com os instantes em que ocorrem contingências na rede, tendo um valor menor durante a ocorrência da contingência, que pode ser visto na Figura 5.7.

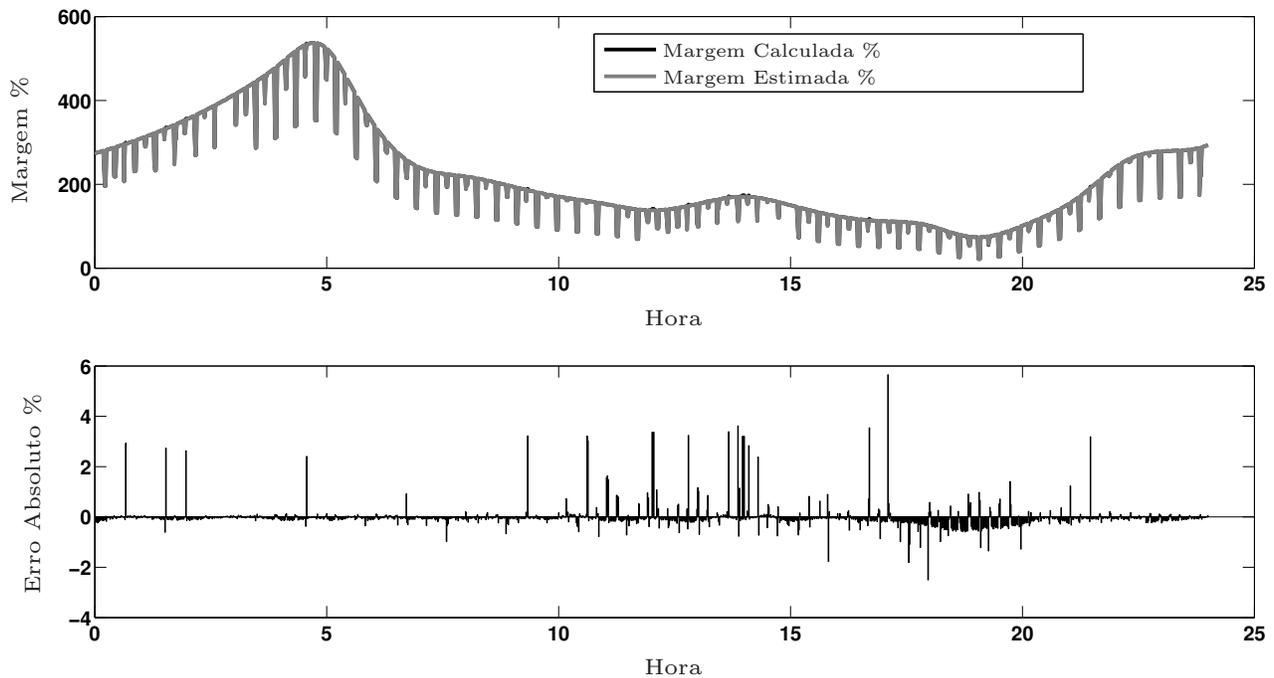


Figura 5.6: Margem Estimada e Calculada - Modelo não linear

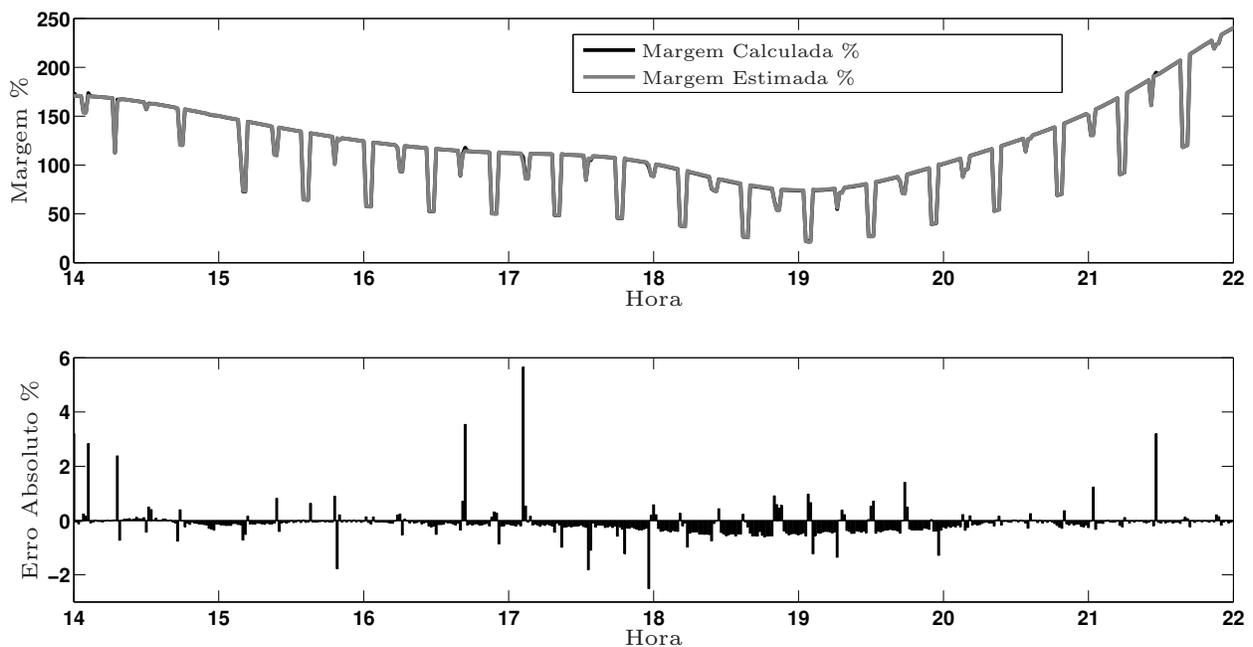


Figura 5.7: zoom da região de carga pesada - Modelo não linear

As Figuras 5.8(a) e 5.8(b) mostram uma representação gráfica da correlação entre a margem estimada e a margem calculada. Os gráficos apresentam os valores da margem estimada versus os valores da margem calculada. A linha diagonal representa o lugar geométrico em que os valores de ambas as margens coincidiriam caso as duas margens fossem perfeitamente correlatas. Esta

técnica de apresentação dos resultados foi inspirada em Zhou et al. (2010) e fornece uma maneira gráfica e rápida para a avaliação da qualidade da estimação.

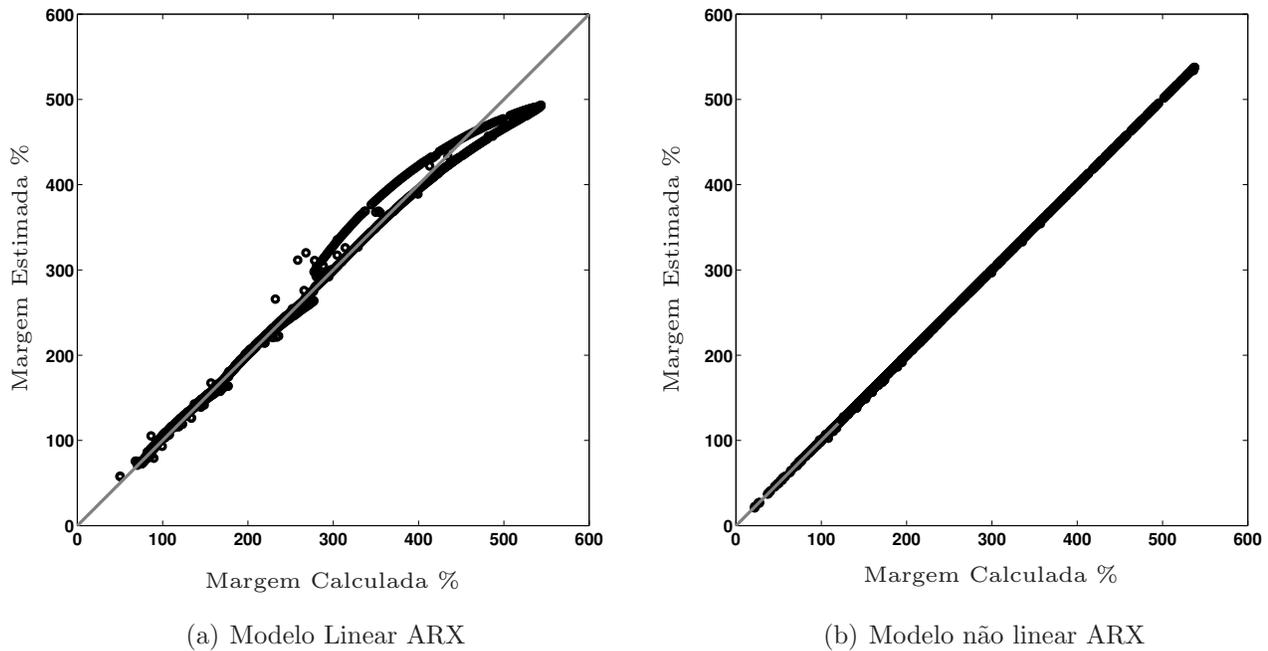


Figura 5.8: Correlações com PMUs em todas as barras.

A estimação utilizando o modelo linear mostrou um desvio significativo em relação à linha diagonal. No entanto, os resultados apresentados para a estimação da margem utilizando o modelo não linear se mostraram bastante promissores com boa aderência à reta diagonal. Entretanto, foi considerada a alocação de uma unidade de medição fasorial em todas as barras do sistema. Nas próximas seções duas estratégias de alocação de PMUs são analisadas, visando a identificação do número mínimo de PMUs necessárias para o bom desempenho do método.

5.4.2 Alocação de PMUs

Um tópico importante quando se trata do estudo de uma nova tecnologia de medidores é a da alocação apropriada desses medidores nas barras do sistema. Dependendo da aplicação para a qual as medidas das PMUs serão destinadas, a estratégia de alocação e quantificação das unidades se torna crucial para o sucesso da implementação.

Uma das aplicações que mais se beneficiou com o advento das PMUs foi a estimação de estados.

Este tipo de aplicação sempre dependeu da qualidade e abrangência das medições do sistema e com a tecnologia de PMUs permitindo medidas das grandezas do sistema com maior precisão e em tempo real, a área de estimação de estado está ganhando novos horizontes.

Um dos primeiros trabalhos a tratar o problema de alocação de PMUs pode ser visto em (Mili et al., 1990) que investigou uma estratégia de alocação de PMUs também na rede *Newengland*, visando a análise da estabilidade de tensão. Esta estratégia, utiliza o conceito de conjunto de barras coerentes no que diz respeito à dinâmica da tensão, um grupo de barras coerentes apresenta um comportamento semelhante nas magnitudes e ângulos dos fasores de suas tensões em resposta a alguma perturbação na rede, como mudanças na demanda, na geração ou na topologia. Após identificar as barras coerentes, cada grupo define uma região coerente e a estratégia busca uma barra dentro de cada região que melhor reflita o comportamento da região para a instalação da PMU. De acordo com os autores esta estratégia não mostrou resultados satisfatórios para o problema de estabilidade de tensão, os mesmos propuseram ajustes ao método, além disso uma segunda estratégia de alocação de PMUs com o objetivo de estimação de estados foi proposta.

Na referência (Nuqui & Phadke, 2005) os autores desenvolveram técnicas para alocar as PMUs de forma a garantir a completa observabilidade de todas as barras do sistema utilizando técnicas de busca em árvores e *Simulated Annealing*. A completa observabilidade das barras do sistema é um requisito importante para a estimação de estado, pois garante que nenhuma área do sistema ficará sem medidas ou estimativas de seu estado.

Diversos trabalhos sobre a utilização de PMUs para a estimação de estado podem ser encontrados na literatura, como por exemplo (Chakrabarti & Kyriakides, 2009), que considerou as incertezas nas medidas das PMUs no problema de mínimos quadrados ponderado de estimação de estado, (Abbasy & Ismail, 2009) resolveu um problema de otimização inteira considerando que o sistema possuía tanto medidores convencionais como PMUs para estimar o estado, e (Roy et al., 2011) utilizou métodos heurísticos para resolver o problema de alocação de PMUs visando a observabilidade do sistema.

Além da melhoria da estimação do estado do sistema, é possível alocar as PMUs visando outros objetivos, como por exemplo a referência (An & Zhou, 2006), que aloca as PMUs atendendo, além do critério de observabilidade, o de monitoramento da estabilidade de tensão. Este trabalho classifica as áreas com problemas de tensão olhando a máxima variação de magnitude da tensão nas proximidades do ponto de bifurcação sela-nó.

Além dos aspectos de melhoria da medição, ou observabilidade da rede, existe o aspecto prático de que não seria economicamente viável a instalação de medidores fasoriais sincronizados em todas as barras do sistema, devido aos custos da implantação e posterior manutenção.

Baseados nestes princípios, duas estratégias de alocação de PMUs que têm por objetivo o monitoramento e estimativa do valor da margem de estabilidade de tensão foram utilizadas nos estudos desta tese.

Uma das estratégias utiliza como critério de classificação das barras os fatores de participação modal ativa e reativa das barras e a outra utiliza a variância das medidas contidas num banco de dados. Na estratégia que utiliza os valores das variâncias das medidas do banco de dados, após a montagem do banco de dados, calcula-se a variância dos valores de magnitude das tensões das barras, desta forma as barras que tiveram os maiores valores são classificadas para receber uma PMU.

Para a implementação da estratégia de alocação apenas cinco barras com os maiores valores de variância foram escolhidas para receber uma PMU, sendo que nos estudos desta tese uma análise da influência do número de medidores foi realizada na qual diminuía-se sistematicamente o número de PMUs no sistema partindo da lista de cinco barras até uma lista com apenas três barras.

A ideia de utilizar a variância dos valores contidos no banco de dados, baseia-se no fato de estarmos trabalhando com técnicas de identificação de sistemas. Ao utilizar no banco de dados medidas com valores elevados de variância, espera-se poder coletar a maior gama possível de comportamentos da tensão no cálculo dos parâmetros do modelo.

Assim, para a rede utilizada e o banco de dados construído, as barras com maior valor de variância em ordem decrescente foram as seguintes:

Tabela 5.2: Barras com maiores valores de variância no banco de dados em ordem decrescente

Variância	número da barra
0,00046788	15
0,00045463	4
0,00044424	8
0,00044272	12
0,00043284	7
0,00037776	14
0,00036491	36
0,00035502	5
0,00033703	27
0,00032153	21
0,00031546	17
0,00031501	18
0,00031048	6
0,00030147	16
0,00028289	24

As variâncias das grandezas registradas no banco de dados para as barras também podem ser vistas no gráfico de barras da Figura 5.9, que pode ser visto como um gráfico com os espectros de variância das medidas.

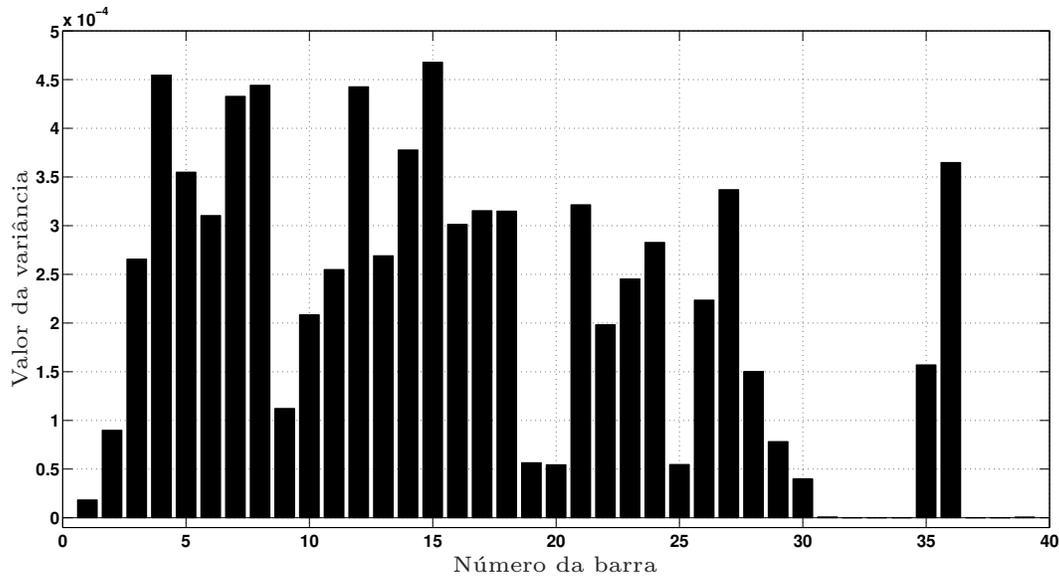


Figura 5.9: Gráfico com o espectro de variâncias do banco de dados

Da lista de barras com maior variância, considerou-se que o sistema possuía PMUs apenas nas 5 primeiras posições da lista, ou seja, 15, 4, 8, 12 e 7, cuja localização pode ser vista no diagrama da Figura 5.10. Os números das barras selecionadas pelo critério proposto estão ressaltados.

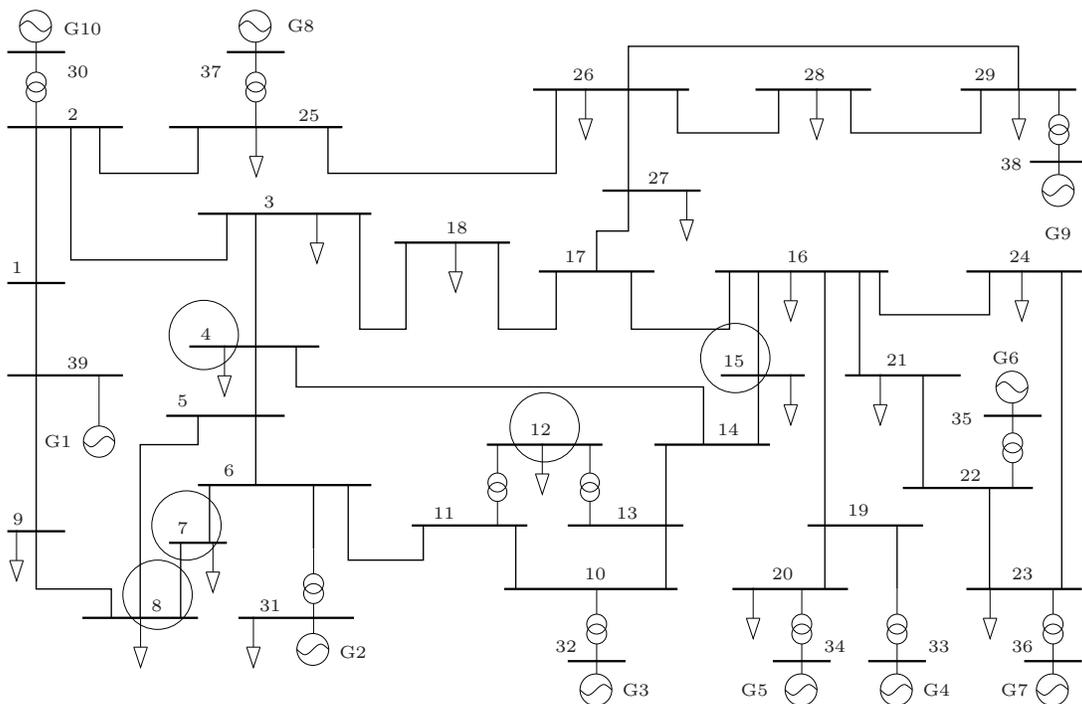


Figura 5.10: Diagrama unifilar do sistema com as barras com maior variância marcadas.

5.4.3 Resultados considerando alocação pelo critério da variância

A seguir são apresentados os resultados da estimação da margem de estabilidade de tensão considerando PMUs instaladas apenas nas barras classificadas pelo critério. Na Figura 5.11 pode-se observar o gráfico com os valores calculados da margem e os estimados pelo modelo Linear ARX obtido, na qual é possível observar a margem calculada, a margem estimada, e o erro absoluto para o caso linear. Pode-se notar que a precisão nesse caso não se mostrou adequada, principalmente para o patamar de carga leve. Entretanto para o patamar de carga pesada a estimativa apresentou resultados satisfatórios.

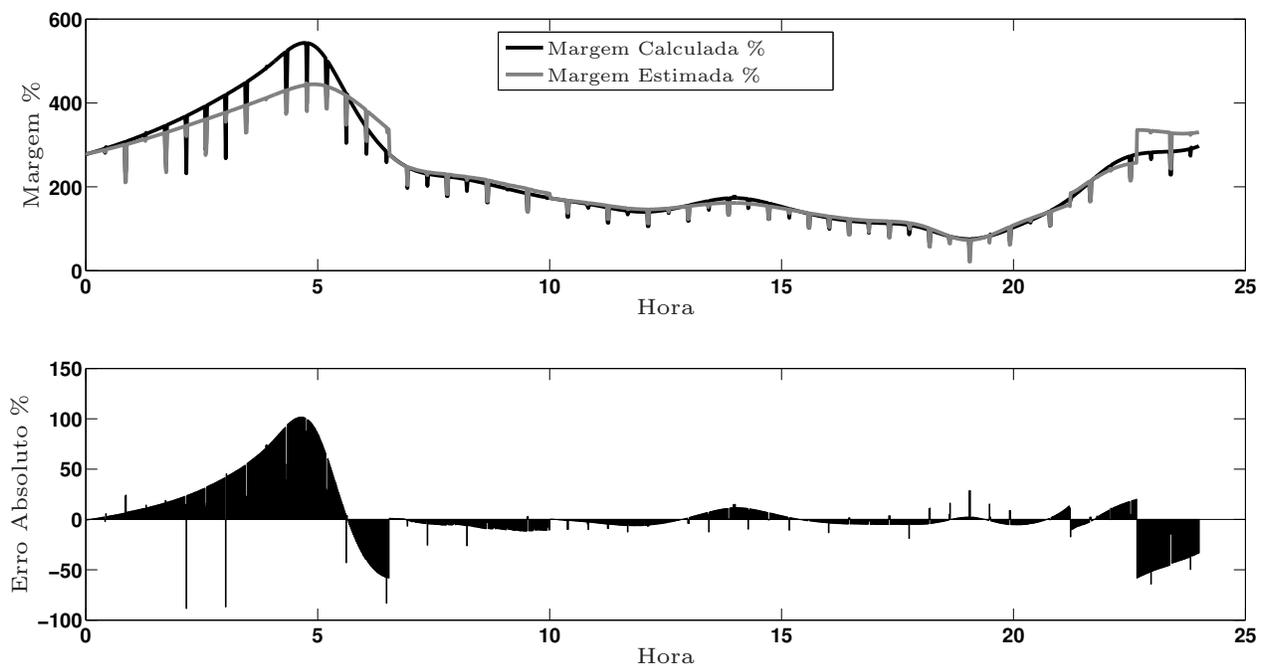


Figura 5.11: Margens - critério da variância - Modelo Linear

Uma observação mais detalhada do gráfico permite concluir que a estimação não se mostrou satisfatória apenas nas regiões em que a margem estava com valor mais elevado. Entretanto nos horários em que a margem possui valores mais altos o erro cometido pela estimação não seria tão grave, pois nesses horários o sistema estaria operando longe do colapso.

O gráfico da Figura 5.12 apresenta o comportamento do máximo erro absoluto em função da variação da ordem do polinômio do modelo linear para o caso de alocação de PMUs pelo método da variância. Nota-se que à medida que a ordem dos polinômios dos modelos aumenta, o máximo erro absoluto diminui para os patamares de carga média e pesada. Para o patamar de carga leve

o mesmo comportamento não foi observado, neste caso o máximo erro absoluto cresceu com o aumento da ordem do polinômio.

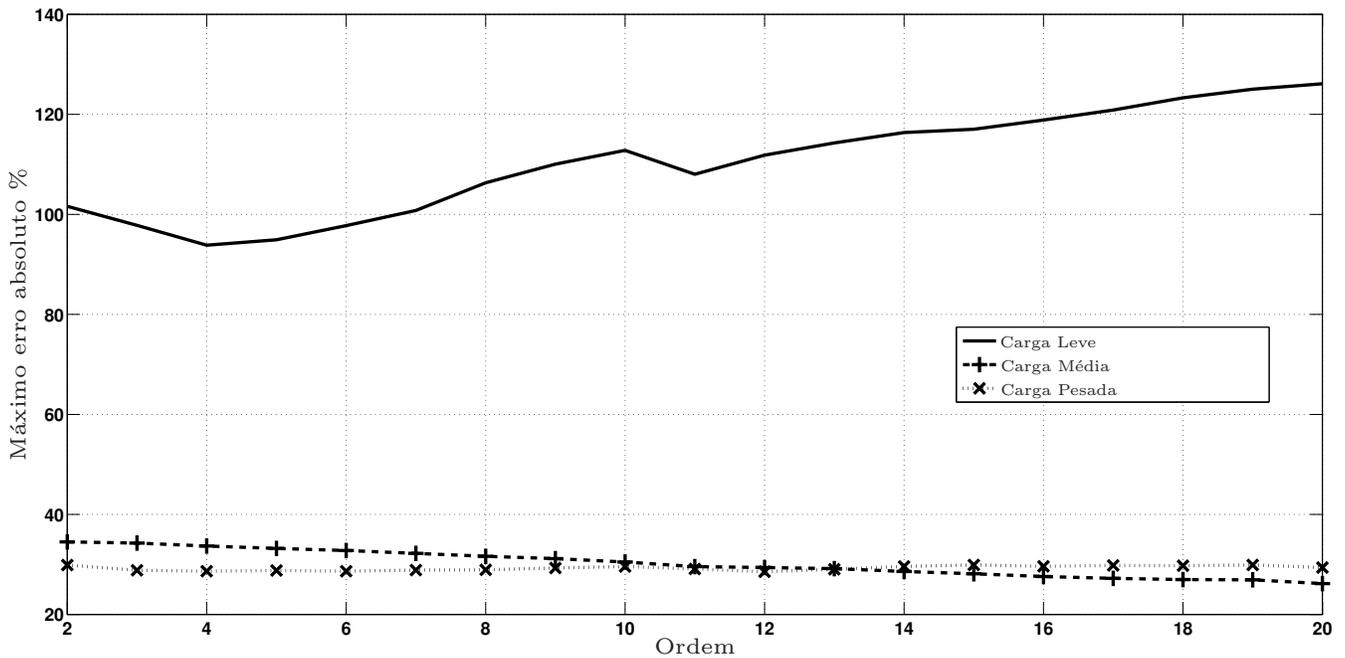


Figura 5.12: Máximo erro absoluto - critério da variância - Modelo Linear

A análise da Figura 5.12 permite identificar as ordens dos polinômios de modo a se obter um modelo com menor erro absoluto possível, resultando nas ordens dos polinômios contidos na Tabela 5.3. No entanto, observa-se que o modelo ARX linear não é adequado para tratar o problema proposto, apresentando erros elevados principalmente para o patamar de carga leve.

Tabela 5.3: Ordens dos polinômios $B(q)$ - Modelo Linear e critério da Variância

Ordem de $A(q) = 1$	carga leve	carga média	carga pesada
PMU em todas as barras	11	4	2
Critério da Variância	4	20	4

Para o critério de alocação de PMUs utilizando a variância, os parâmetros de um modelo não linear ARX foram calculados e os resultados da margem estimada, bem como da margem calculada e do erro entre ambos pode ser visto nos gráficos da Figura 5.13. Observa-se que a margem estimada utilizando o modelo não linear se mostrou muito mais próxima da margem calculada quando comparada com a margem obtida utilizando o modelo linear. O maior erro

absoluto foi menor que 20%, ocorrendo para o patamar de carga leve, é importante ressaltar que neste patamar a margem de estabilidade apresenta valores maiores que 200%, de modo que o erro encontrado não é significativo.

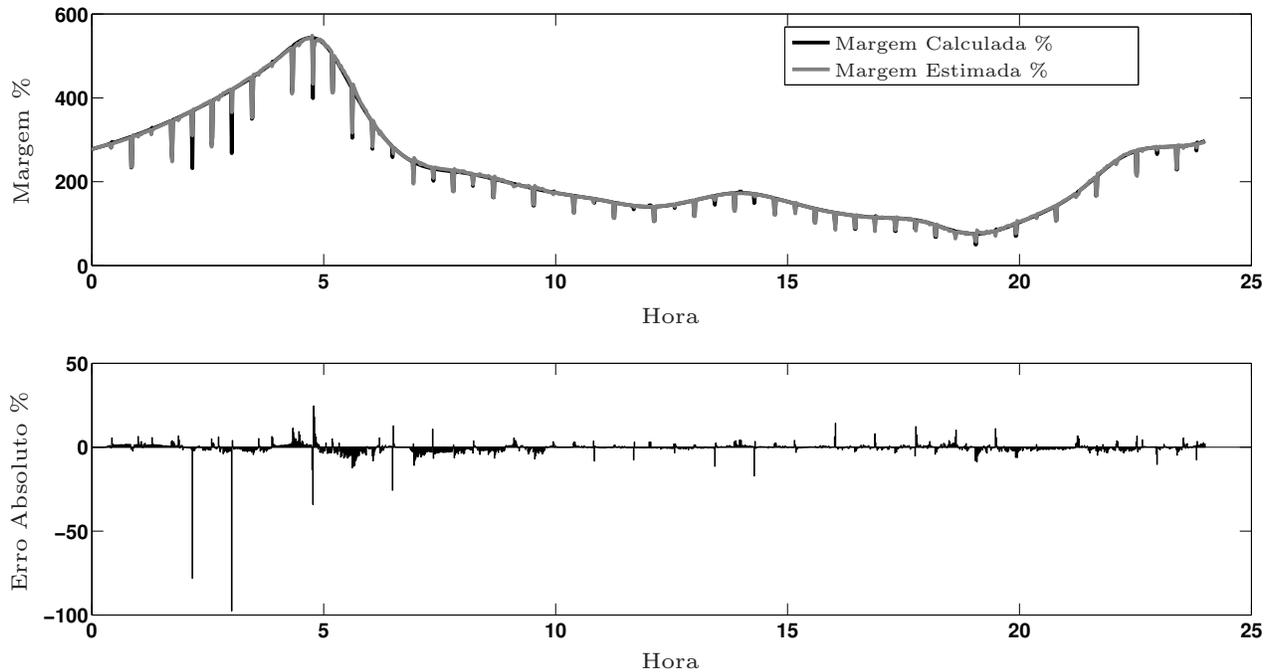


Figura 5.13: Margens - critério da Variância - Modelo não linear

Em compensação, na região de patamar de carga pesada, em que os valores das margens possuem valores relativamente menores, o erro absoluto ficou na maior parte do tempo abaixo de 5% ocorrendo apenas alguns picos nos momentos de aplicação de contingências, como pode ser visto na Figura 5.14.

É importante mencionar que as estimativas calculadas para a região de patamar de carga pesada, apesar de possuírem alguns picos de erros em alguns pontos de aplicação de contingências, estas se mantiveram em sua grande maioria abaixo de 10%. Além disso, o operador teria uma estimativa confiável da proximidade do ponto de operação do sistema do ponto de colapso, nas regiões em que o sistema se encontra mais carregado, e conseqüentemente mais suscetível a problemas de colapso de tensão.

Uma vez que o estimador não linear é capaz de monitorar com precisão adequada o valor da margem, seria possível, baseado na experiência dos operadores, definir um limite de valores admissíveis para a margem para aquele horário do dia de forma que se fosse violado poderia ocasionar uma sequência de ações preventivas por parte dos operadores.

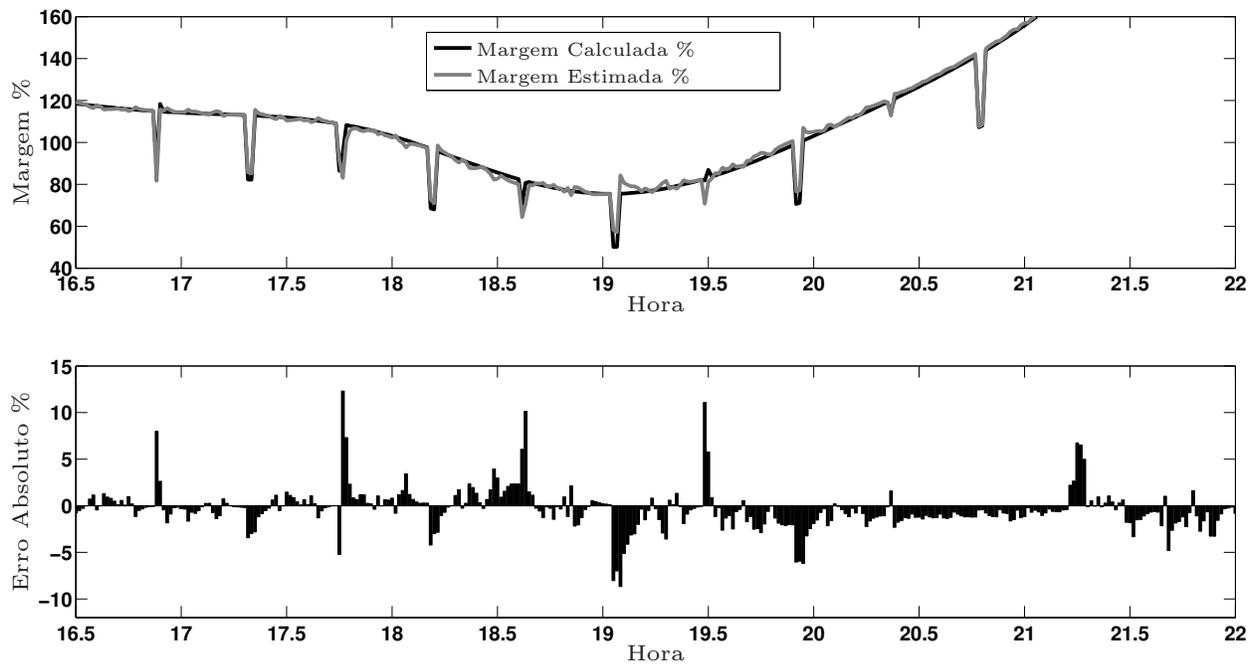


Figura 5.14: Zoom na região de carga pesada - Modelo não linear - critério da variância

Os gráficos com a correlação das margens estimadas considerando PMUs alocadas pelo critério da variância, com o modelo linear e não linear podem ser vistos nas Figuras 5.15(a) e 5.15(b), respectivamente. Os gráficos de correlação permitem uma comparação visual da qualidade dos estimadores de margem, e é possível notar que as margens estimadas utilizando o modelo não linear estão mais correlacionadas com as margens calculadas em comparação ao modelo linear, com exceção de alguns poucos pontos que se distanciaram da reta de correlação unitária mas que correspondem ao patamar de carga leve. Visualmente o aspecto da distribuição dos pontos considerando o modelo linear é muito distinto da reta de correlação unitária, enquanto que no caso do modelo não linear, a distribuição de pontos se assemelha mais a reta diagonal indicando uma grande correlação entre os valores estimados e os calculados.

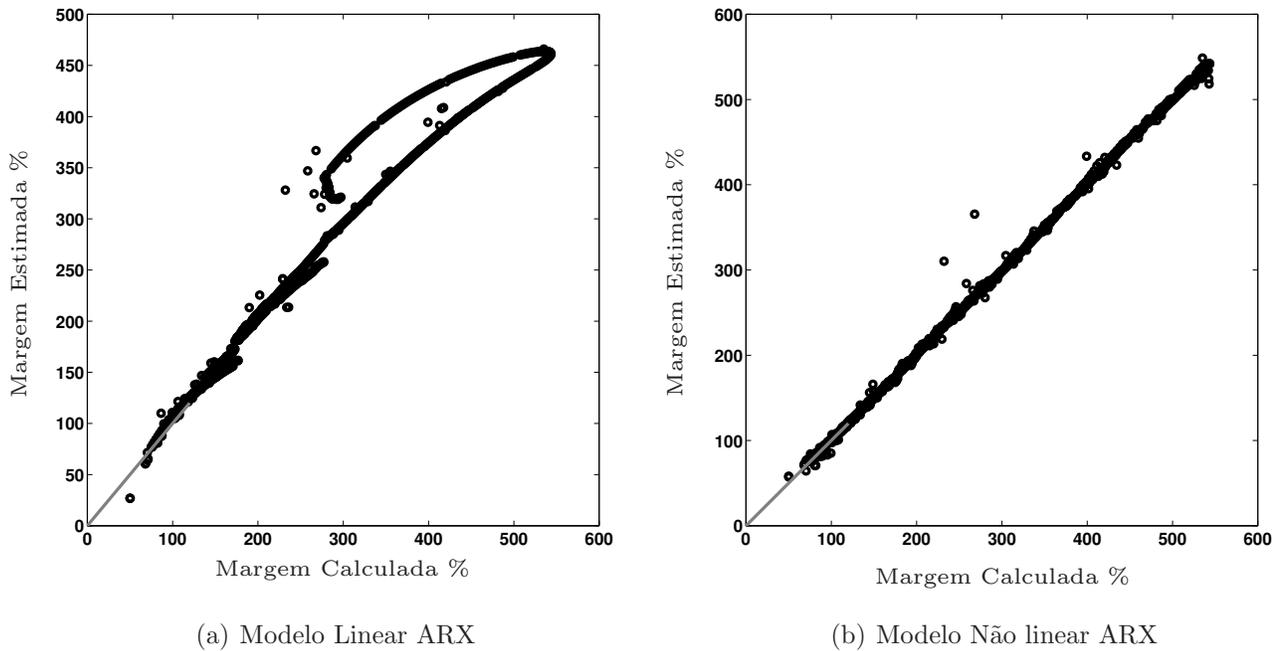


Figura 5.15: Correlações das margens com PMUs alocadas pelo critério da variância.

Adicionalmente ao estudo de alocação das PMUs foi realizado um estudo do efeito da diminuição do número de medidores na qualidade da estimação. Com a lista de barras candidatas obtida do critério da variância, iniciou-se uma diminuição gradual do número de PMUs instaladas, alocando-se primeiramente nas 5 primeiras barras listadas e logo após reduzindo-se o número para 4 e por fim 3 PMUs, retirando as barras com pior classificação no critério. Nas Figuras 5.16(a) e 5.16(b) é possível observar os gráficos de correlação resultantes do estudo. Além do procedimento previamente citado, o gráfico apresenta também como valor de referência a correlação para o caso de alocação utilizando as barras encontradas pela referência Zhou et al. (2010) que utilizou um algoritmo de redes neurais artificiais para definir as barras. As barras encontradas pela referência foram: 5, 10, 11, 30 e 35. Percebe-se que o modelo não linear continua fornecendo uma boa estimativa mesmo com a eventual perda de uma ou duas PMUs.

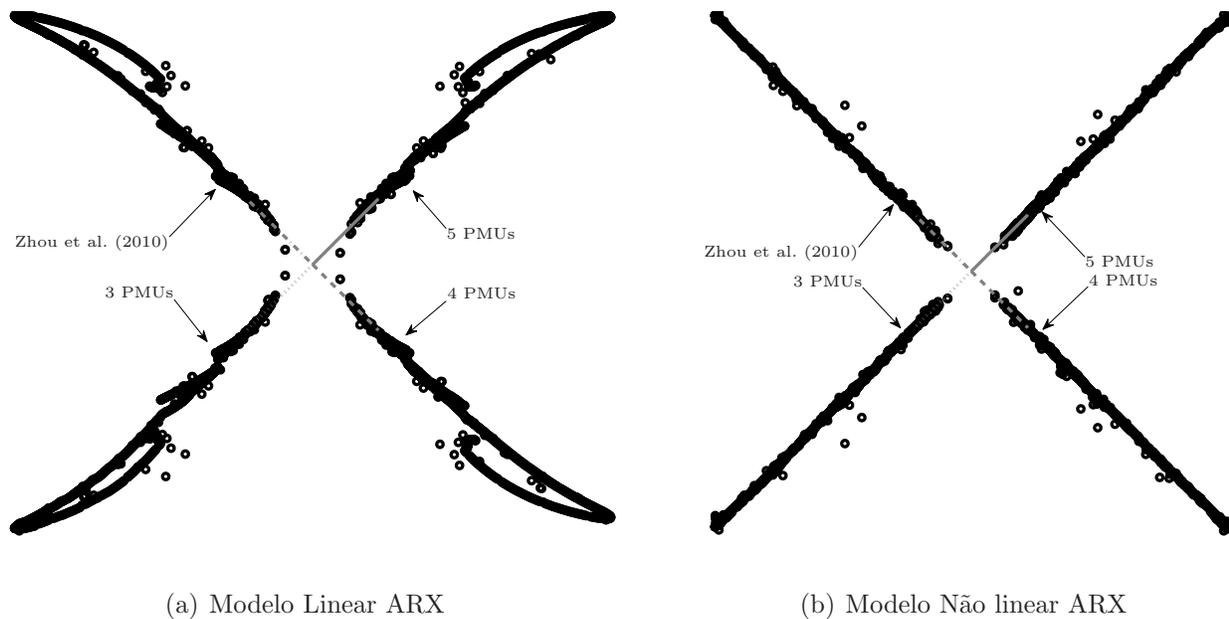


Figura 5.16: Correlações considerando redução no número de PMUs - critério da variância.

5.4.4 Resultados considerando a alocação pelo critério do fator de participação modal

Na alocação de PMUs utilizando o critério de fator de participação modal, as barras selecionadas para receber as unidades de medição são aquelas que apresentam maiores valores de fator de participação modal ativo e reativo (da Silva et al., 2002). Os fatores de participação foram calculados a partir da matriz Jacobiana obtida próximo do ponto de colapso em cada um dos cenários contidos no banco de dados. Desta forma, espera-se medir os fasores das grandezas das barras com maior sensibilidade $\Delta V/\Delta Q$ ou $\Delta V/\Delta P$. Desta maneira, as barras classificadas serão capazes de fornecer a informação necessária em um amplo conjunto de cenários operativos, com rede completa ou em contingência.

O valor do fator de participação modal foi obtido utilizando o seguinte procedimento:

- Para cada cenário de carregamento e contingência do banco de dados, uma curva PV do sistema é construída.
- Efetua-se o cálculo da matriz Jacobiana reduzida ativa e reativa e obtenção dos modos do sistema.

- os fatores de participação, ativo e reativo de cada barra, referente ao modo mais crítico nas proximidades do “nariz” da curva PV foi calculado.
- Assim para os 1441 pontos do banco de dados de um dia as barras tinham um valor de fator de participação ativo e reativo para os mais diversos cenários.
- Um fator de participação médio foi calculado pela média aritmética dos valores dos fatores de participação de todos os pontos da curva de carga.
- O processo é repetido para todos os dias incluídos no banco de dados.
- O valor do fator de participação final é a média dos valores médios encontrados para cada dia.

As barras que apresentaram maior fator de participação médio eram classificadas numa lista de candidatas a receberem uma PMU, a listagem com as barras com os maiores valores de fator de participação ativo (FPA) e reativo (FPR) podem ser vistas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Barras com maiores valores de fator de participação modal em ordem decrescente

Barra	FPR	Barra	FPA
7	1	36	1
8	0.9598	27	0.98357
12	0.8557	12	0.96309
5	0.8282	26	0.94934
6	0.76754	10	0.93808
4	0.71092	35	0.9294
14	0.61714	9	0.92883
11	0.58612	11	0.91216
13	0.54913	1	0.90697
10	0.45952	18	0.90347

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam os espectros dos fatores de participação reativo e ativo médio respectivamente, calculados e utilizados para a seleção do critério. No caso do espectro de FPA, as barras do gráfico em cinza correspondem a barras PV.

Desta forma criou-se duas listas de classificação uma para o fator de participação ativo (FPA) e outra para o fator de participação reativo (FPR). Durante os testes observou-se que muitas das barras com valor de FPA alto, eram barras cuja magnitude da tensão era controlada, o que produziu resultados insatisfatórios. O FPA dessas barras foi elevado pois as mesmas tinham a magnitude de suas tensões mantidas por grandes reservas de reativos, o que já era previsto pelo cálculo do FPA. Infelizmente para o estimador essas barras se mostraram pouco eficazes, uma vez que suas tensões eram artificialmente mantidas pela reserva de reativos dessas barras.

Como o estimador foi projetado para operar com as medidas das magnitudes sem a necessidade de utilizar as informações das reservas de reativos, o fato de essas barras terem suas tensões mantidas pelas reservas de reativos disfarçou o problema de redução de reservas de reativos, afetando negativamente a qualidade da estimação.

Diversos testes foram realizados com várias combinações de barras e uma listagem de 5 barras que combinava as barras selecionadas pelo FPA e pelo FPR com resultados satisfatórios foi obtida, a listagem pode ser vista na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Lista das barras selecionadas combinando o FPA e o FPR

27, 7, 12, 14, 26

A Figura 5.19 apresenta o diagrama unifilar do sistema com as barras selecionadas pelos dois critérios selecionadas, as barras selecionadas pelo critério da variância estão marcadas com uma circunferência e as barras selecionadas na combinação de FPA e FPR estão marcadas com triângulos e quadrados, os triângulos marcam as barras com grande valor de FPA e os quadrados marcam as barras com grande valor de FPR.

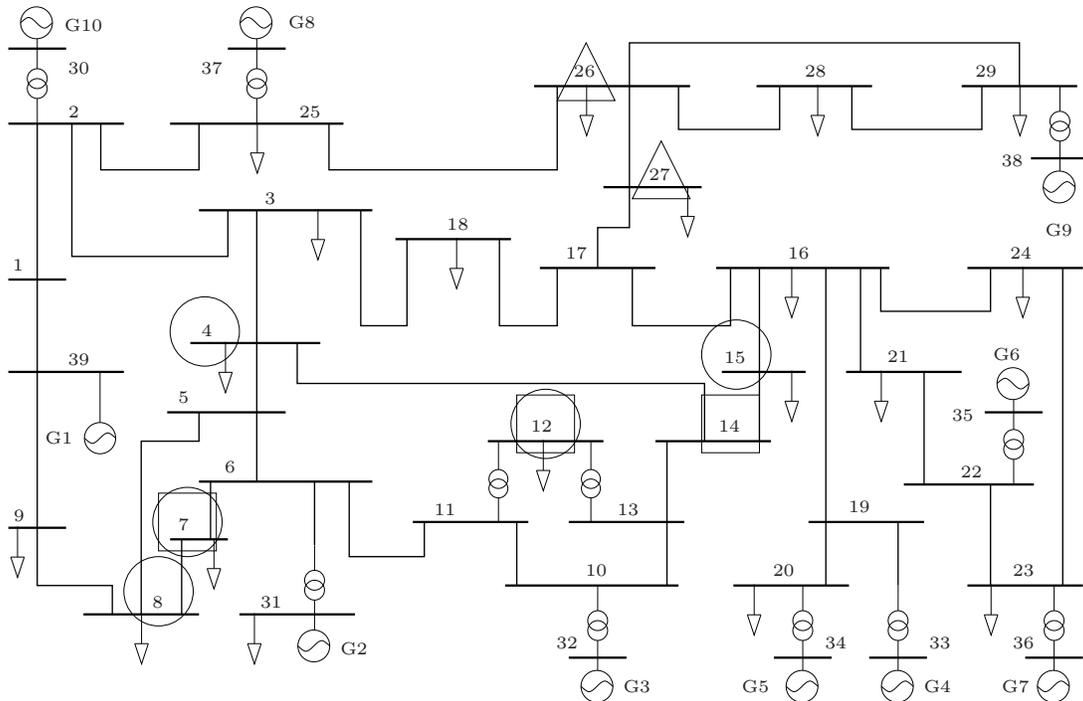


Figura 5.19: Diagrama unifilar do sistema com as barras selecionadas pelos dois critérios marcadas.

Analisando-se as barras selecionadas na lista combinada de FPA e FPR, pode-se notar que apesar da barra 36 possuir um valor de FPA elevado, não foi incluída na listagem. Por ser uma barra PV, a magnitude da tensão dessa barra se modifica muito pouco em resposta às mudanças de carregamento e topologia e a resposta do estimador não foi satisfatória. A barra 7 aparece na lista pois é a barra que tem o maior FPR, a barra 12 aparece na lista de FPA e FPR entre as 10 barras com maior valor e por isso foi incluída.

Para ser possível comparar com o critério de seleção de barras por variância, a listagem também possui 5 barras, desta forma as barras 14 e 26 foram incluídas por estarem entre as com maior valor de fator de participação modal e por terem um comportamento não redundante com relação às demais barras.

A Figura 5.20, apresenta os resultados da estimação da margem utilizando o modelo linear considerando a alocação de PMUs dada pela listagem obtida da combinação das barras com maiores FPA e FPR.

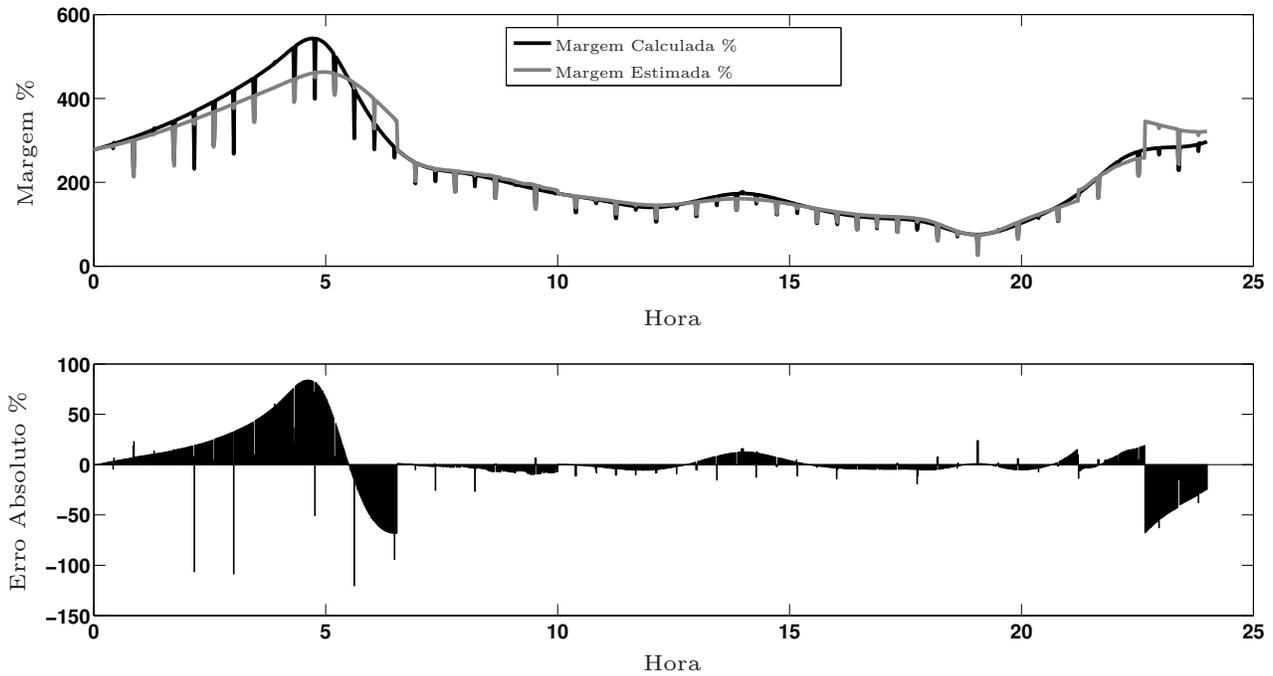


Figura 5.20: Margens - critério do Fator de Participação Modal - Modelo Linear

Os resultados para o critério do fator de participação modal utilizando o modelo linear para estimar a margem se mostraram bastante semelhantes aos resultados considerando o critério da variância. Para a região de patamar de carga leve, a estimativa do valor da margem não obteve precisão adequada, enquanto que nas regiões de patamar de carga média e pesada, apresentou melhores resultados, entretanto a qualidade dos resultados não foi adequadamente precisa.

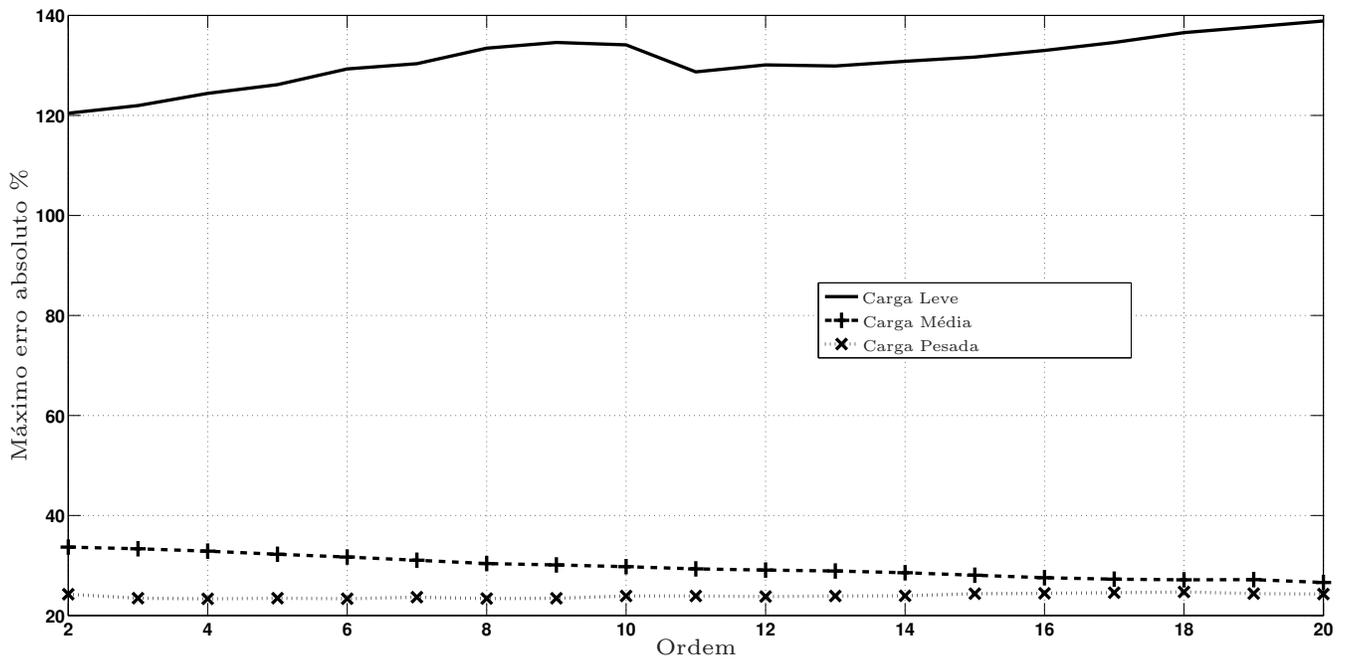


Figura 5.21: Máximo erro absoluto - Modelo Linear - critério do Fator de Participação Modal.

A análise da relação entre a ordem do polinômio dos modelos lineares utilizados na estimação e o máximo erro absoluto proveniente do modelo foi realizada para o critério do fator de participação modal e seu resultado pode ser visto no gráfico da Figura 5.21. Pela análise do comportamento do máximo erro absoluto registrado nas simulações, determinou-se a ordem dos polinômios utilizados no modelo de estimação linear de acordo com a Tabela 5.6 que produzissem o menor valor para o máximo erro absoluto.

Tabela 5.6: Ordens dos polinômios $B(q)$ - Modelo Linear e critério de Fat. de Partc. Modal

Ordem de $A(q) = 1$	carga leve	carga média	carga pesada
Todas as barras	11	4	2
Critério do Fator de participação	2	20	4

Nos gráficos da Figura 5.22 é possível observar os resultados da utilização do modelo não linear para estimar a margem de estabilidade de tensão. Analisando-os é possível observar que os patamares de carga leve obtiveram resultados piores que nos outros patamares, apesar de apresentar resultados melhores que os apresentados pelo modelo linear considerando o mesmo critério de

alocação de PMUS. Desconsiderando alguns pontos em que ocorreram as contingências, os erros absolutos mostraram resultados melhores quando comparados aos do modelo linear.

O modelo para o patamar de carga pesada foi o que obteve melhores resultados, como pode ser visto na Figura 5.23. Neste patamar os valores de margem são os menores e portanto uma maior precisão da estimativa é mais necessária do que no patamar de carga leve no qual os valores de margem são bem maiores.

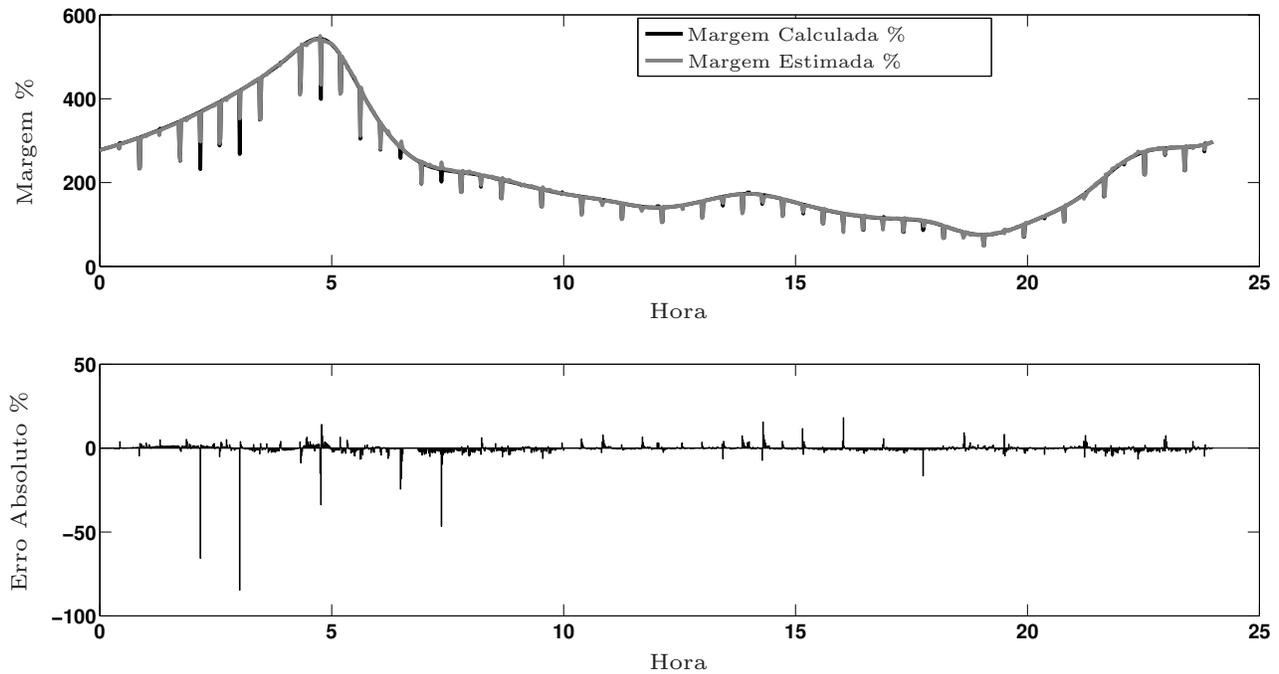


Figura 5.22: Margens - critério do Fator de Participação Modal - Modelo não linear

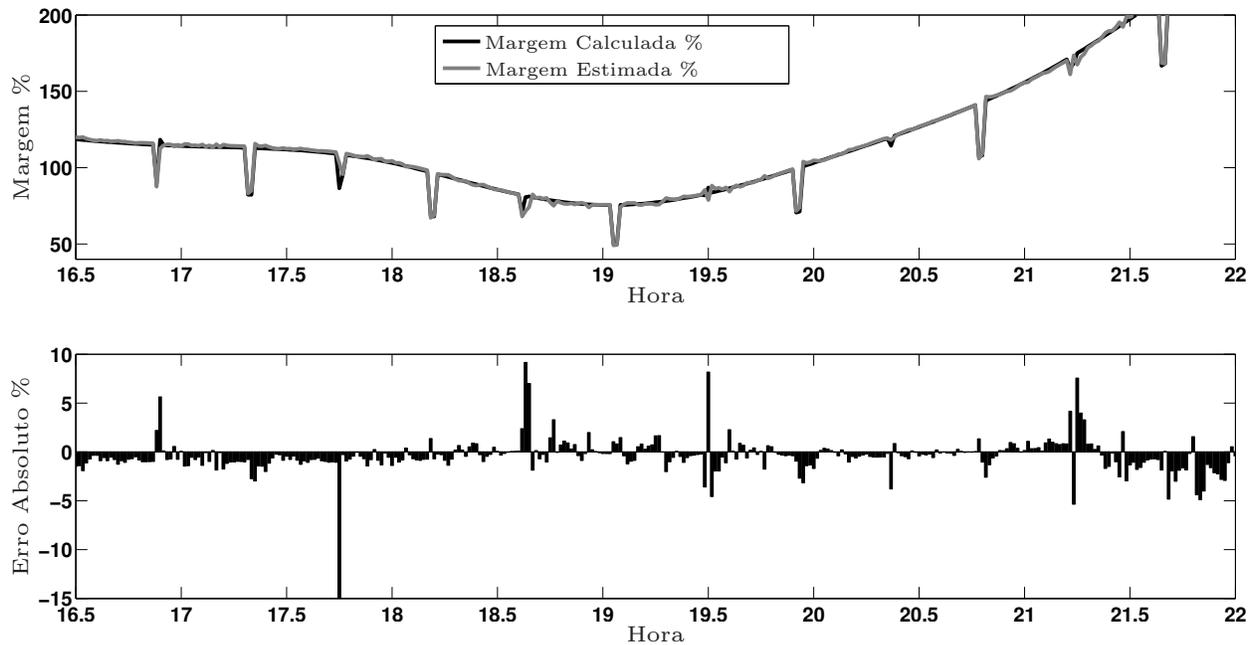


Figura 5.23: Zoom da região de carga pesada - Modelo não linear

O procedimento realizado para avaliar visualmente a qualidade da estimação da margem para o critério da variância foi utilizado para o critério do fator de participação modal, resultando em gráficos de correlação entre os valores das margens calculadas e estimadas, os quais podem ser vistos nas Figuras 5.24(a) e 5.24(b). Visualmente é possível comprovar a baixa correlação entre os valores das margens estimadas e calculadas utilizando o modelo linear. Em compensação ao se utilizar o modelo não linear, pode-se observar uma melhora expressiva na correlação entre os valores, apresentando poucos pontos distantes da reta de correlação unitária.

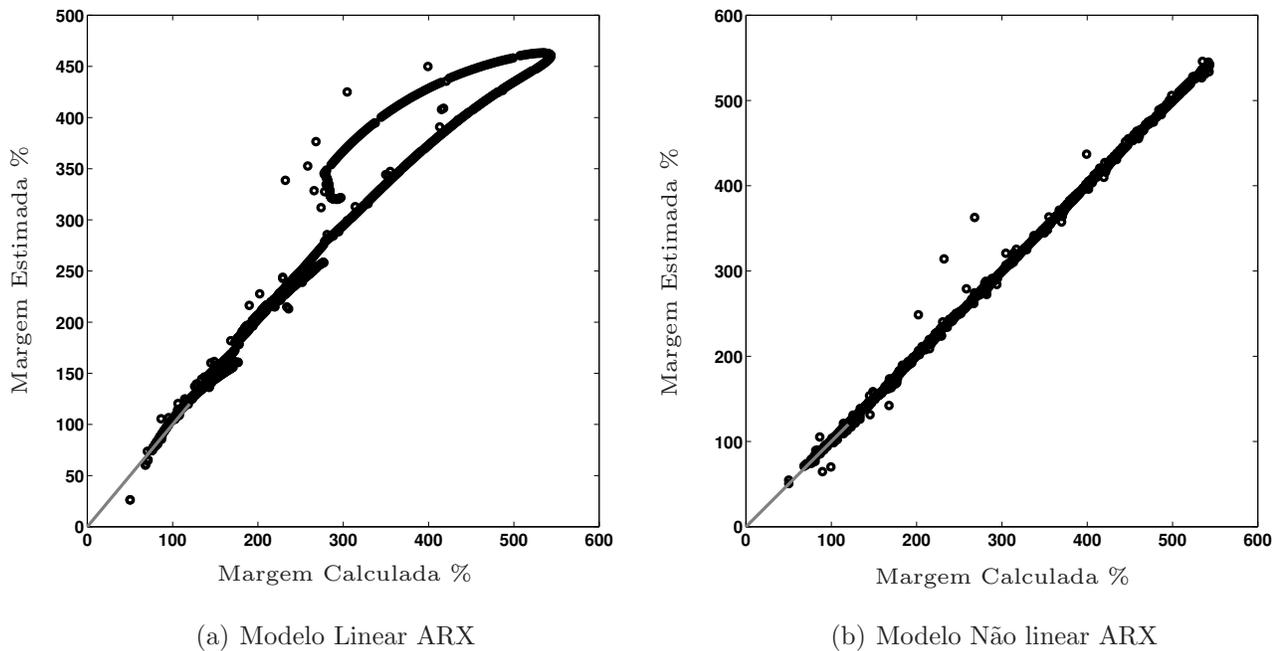


Figura 5.24: Correlações - critério do Fator de Participação Modal

Testes alocando as PMUs somente nas barras com maiores fatores de participação reativos foram realizados com o intuito de comparar com os resultados obtidos considerando o FPA e o FPR combinados. As barras selecionadas considerando apenas o FPR foram as seguintes (7,8,12,5,6). A maioria das barras selecionadas pelo FPR estão próximas uma das outras, com exceção da barra 12, o que poderia trazer problemas caso as medidas fossem utilizadas para a estimação de estados, pois a observabilidade das medidas não seria muito ampla.

O gráfico da Figura 5.25 mostra as margens calculadas e estimadas pelo modelo linear considerando que as PMUs estão instaladas nas barras com maior FPR, no qual é possível observar que este esquema de alocação de PMUs da mesma forma que o esquema que combinou as barras com maior FPA e FPR, não apresentou resultados satisfatórios com o modelo linear. O modelo linear teve um desempenho muito insatisfatório apresentando erros absolutos muito elevados, apesar de como discutido anteriormente o erro na região de carga leve não ser muito significativo devido aos valores elevados das margens.

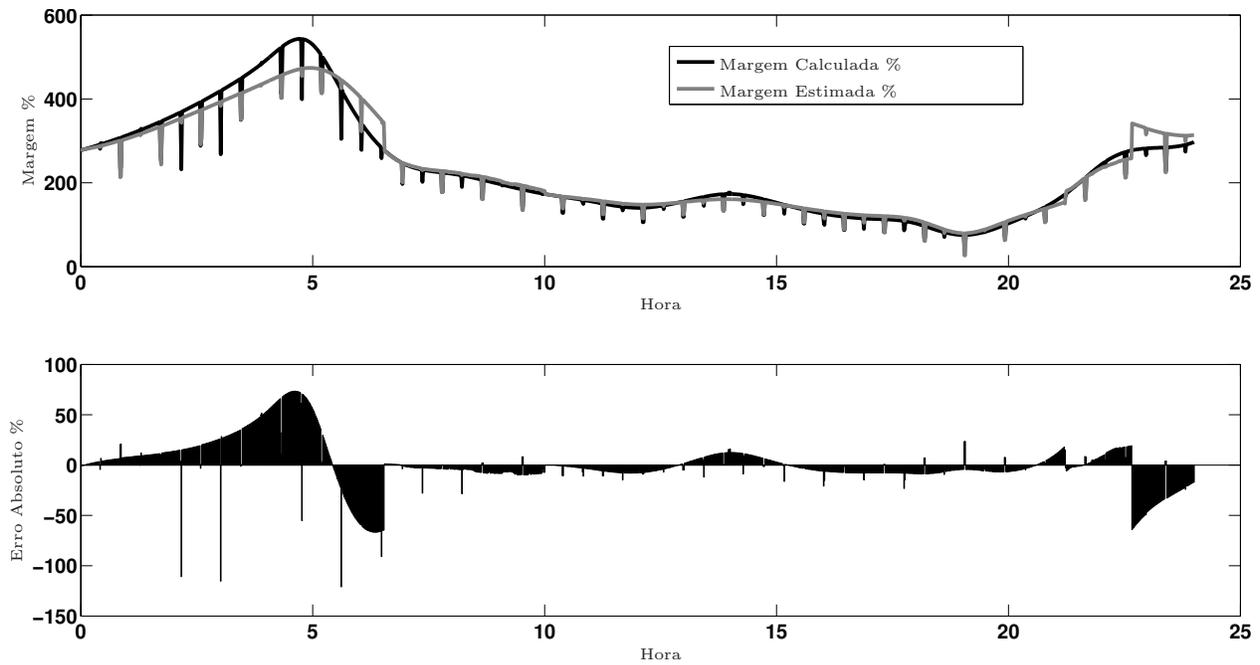


Figura 5.25: Margens - Critério FPR barras (7,8,12,5,6) - Modelo linear.

Uma análise do máximo erro absoluto em função da ordem dos polinômios do modelo linear ARX foi realizada e o resultado pode ser visto na Figura 5.26, cuja análise permite identificar as ordens com menor erro absoluto para cada patamar de carga. Do gráfico pode-se notar que as ordens que apresentaram menor erro para cada patamar foram 2, 20 e 12 para os patamares de carga leve, média e pesada respectivamente.

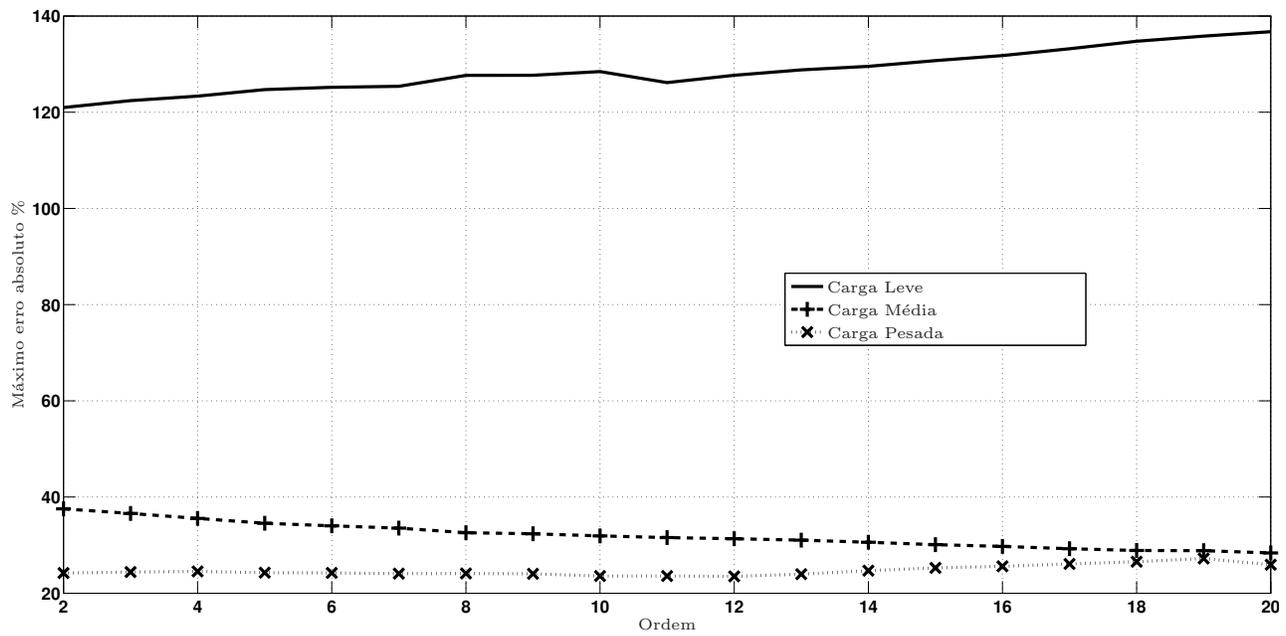


Figura 5.26: Máximo erro absoluto - Critério FPR barras (7,8,12,5,6) - Modelo linear.

Na Figura 5.27 apresenta-se os gráficos das margens calculadas e estimadas utilizando o modelo não linear ARX considerando as PMUS alocadas nas barras somente com maior valor de FPR. Pela análise do gráfico, é possível notar que o modelo não linear para este esquema de alocação obteve resultados melhores do que o caso em que se utilizou a lista de barras que combina o FPA e o FPR. A grande maioria das margens estimadas apresentou um erro em relação às margens calculadas menor que 10%, com exceção de alguns poucos pontos nos momentos de ocorrência de uma contingência.

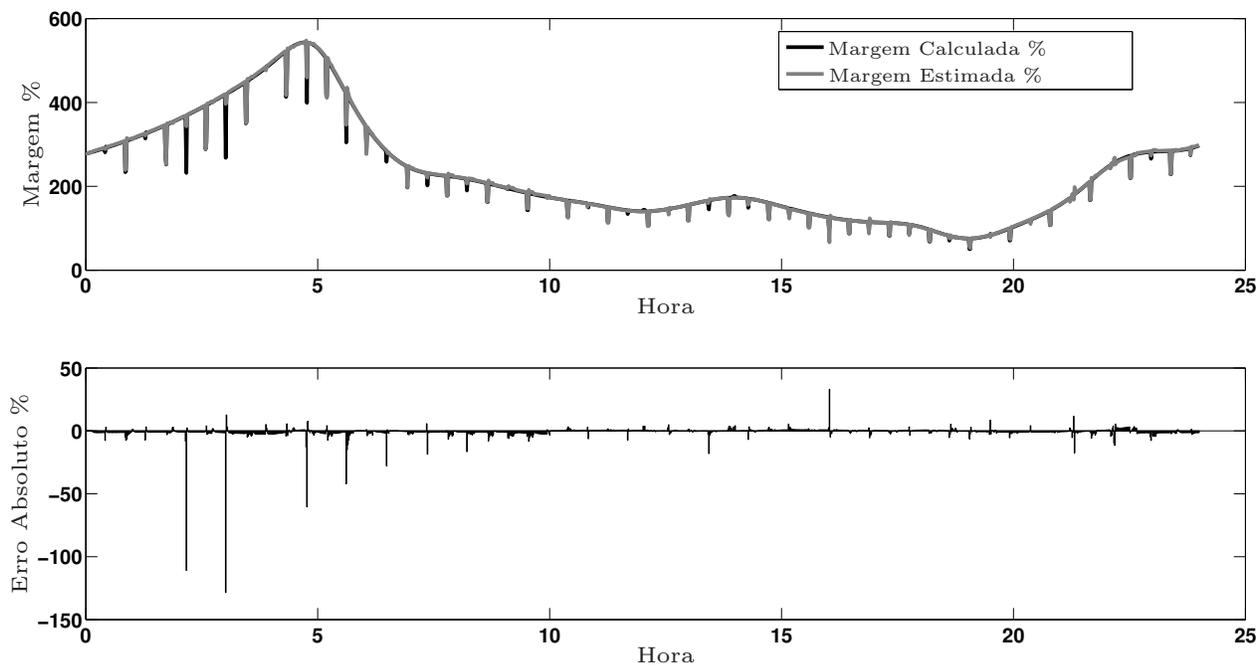


Figura 5.27: Método não linear critério somente FPR 5 barras (7,8,12,5,6)

O modelo não linear ARX para o esquema de seleção de barras que utiliza somente o valor de FPR obteve resultados com grande precisão, principalmente na região de carga pesada, como pode ser visto no gráfico 5.28, em que é mostrado um zoom da região de carga pesada e é possível notar que os erros absolutos nesta região ficaram abaixo de 5% com exceção de poucos pontos em que ocorreram contingências.

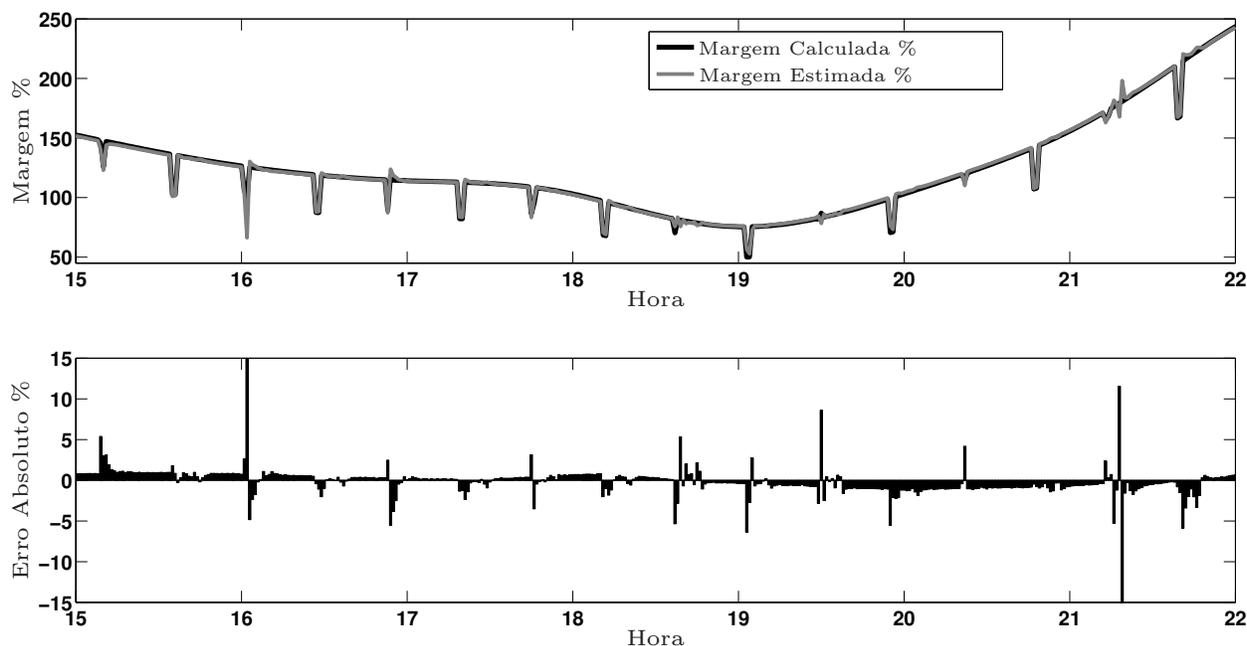


Figura 5.28: Zoom da região de carga pesada - modelo não linear - FPR (7,8,12,5,6)

Nos gráficos 5.29(a) e 5.29(b), apresenta-se os gráficos das correlações utilizando a alocação somente pelo valor de FPR para os casos do modelo linear e não linear, em que é possível verificar claramente a baixa correlação entre os valores estimados e calculados para a margem utilizando o estimador linear, enquanto que o estimador não linear apresentou valores estimados muito mais correlatos com os valores calculados.

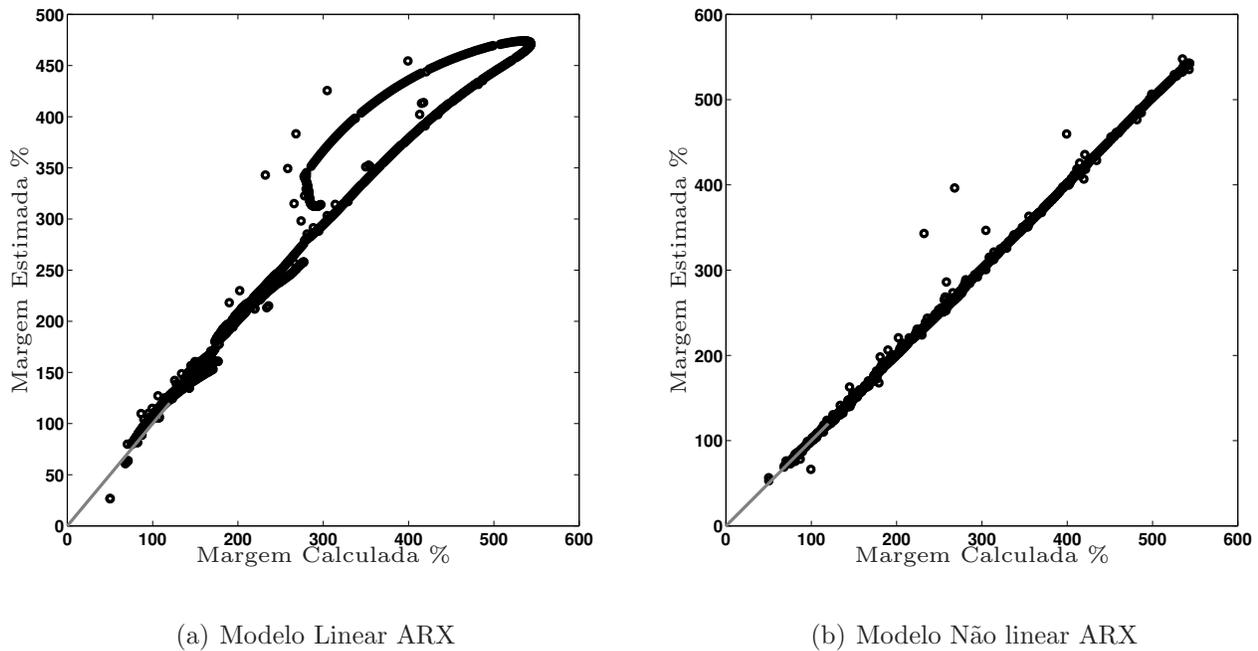
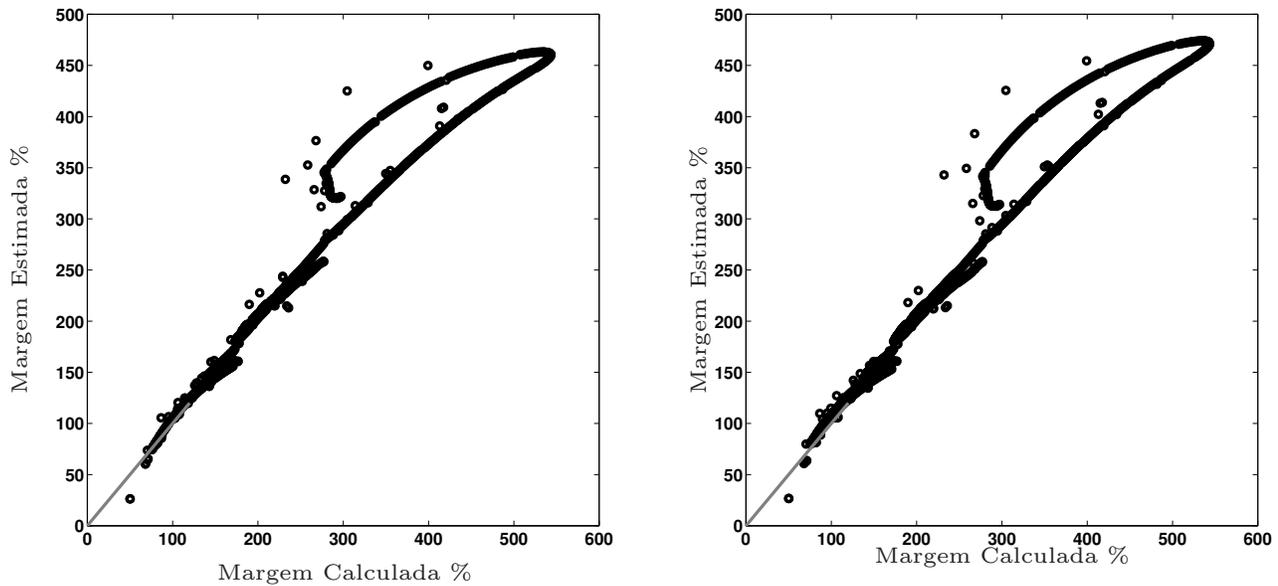


Figura 5.29: Correlações - Critério FPR - (7,8,12,5,6)

Para uma comparação visual entre as listagens de barras utilizando FPA combinado com FPR e somente com FPR, gráficos com as correlações utilizando ambas as listas de barras para a alocação de PMUs foram produzidas. Nas Figuras 5.30(a) e 5.30(b) são mostrados os gráficos com as correlações das duas listagens utilizando um modelo de estimador linear. Analisando os gráficos não é possível notar diferenças significativas na qualidade da estimação utilizando a alocação baseada somente em FPR ou uma combinação dos FPA e FPR para o estimador linear.

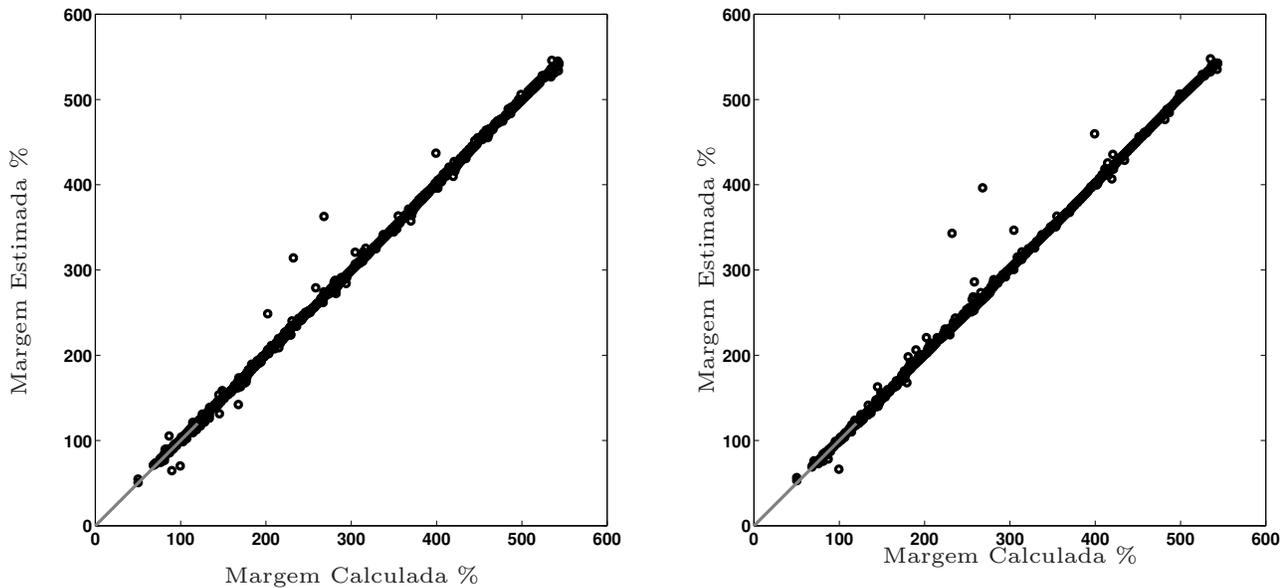


(a) Critério FPA+FPR barras (27,7,12,14,26)

(b) Critério somente FPR barras (7,8,12,5,6)

Figura 5.30: Comparações entre os critérios FPA+FPR e FPR - modelo linear

No caso do estimador não linear, os gráficos de correlação mostrados em 5.31(a) e 5.31(b), respectivamente para a listagem considerando somente FPR e a listagem considerando o FPA e o FPR combinados, mostram uma sutil diferença, a estimativa considerando PMUs alocadas somente pela listagem que considera o FPR apresentou resultados melhores. No gráfico de correlações é possível observar que quando as PMUs estão alocadas de acordo com a lista que considera apenas o FPR, as margens estimadas se mostraram mais correlatas com relação às margens calculadas.



(a) Critério FPA+FPR barras (27,7,12,14,26)

(b) Critério somente FPR barras (7,8,12,5,6)

Figura 5.31: Comparações entre os critérios FPA+FPR e FPR - modelo não linear

Uma análise do efeito da diminuição do número de unidades de medida na rede na qualidade da estimativa foi realizada da mesma maneira que no caso do critério de alocação por variância e os resultados podem ser vistos nos gráficos das Figuras 5.32(a) e 5.32(b) para o modelo que estima a margem do tipo linear e não linear respectivamente.

As barras selecionadas pela referência Zhou et al. (2010) são utilizadas para efeito de comparação e de maneira similar ao realizado para o critério da variância as correlações entre as margens calculadas e estimadas para diversos cenários em que o número de medidores é diferente são plotados em cada um dos quadrantes dos gráficos.

Pela análise dos gráficos de correlação pode se observar que o caso utilizando o modelo linear apresentou resultados piores em termos de correlação das medidas em comparação com o modelo não linear, o que já foi observado na análise das margens considerando as 5 barras determinadas pelo critério do fator de participação. Entretanto, tanto no caso utilizando o modelo linear como no caso utilizando o modelo não linear, os gráficos de correlação não mostraram uma degradação significativa quando o número de medidores diminuiu.

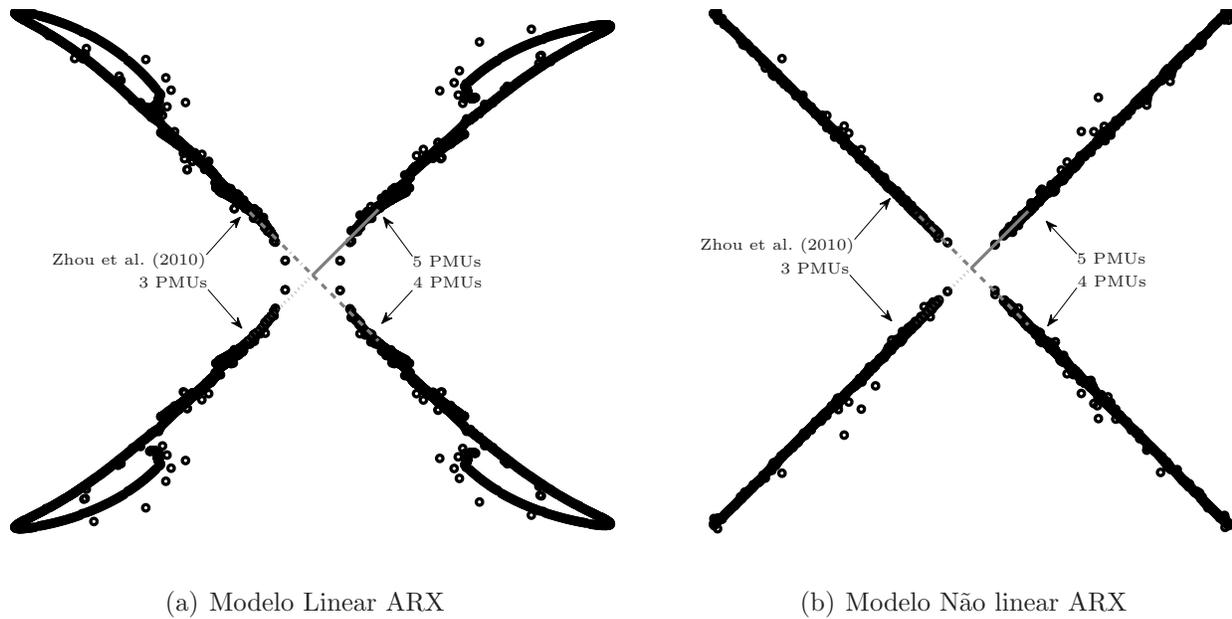


Figura 5.32: Correlações - critério do Fator de Participação Modal Ativo e Reativo

A mesma análise de correlações realizada para o critério que utiliza tanto o fator de participação ativo como o reativo foi repetida para o caso de se utilizar somente o fator de participação reativo e os resultados podem ser vistos nos gráficos 5.33(a) e 5.33(b). Analisando os gráficos pode-se notar que assim como no caso da alocação utilizando os fatores de participação ativo e reativo, a diminuição do número de medidores não afetou significativamente a qualidade da estimativa.

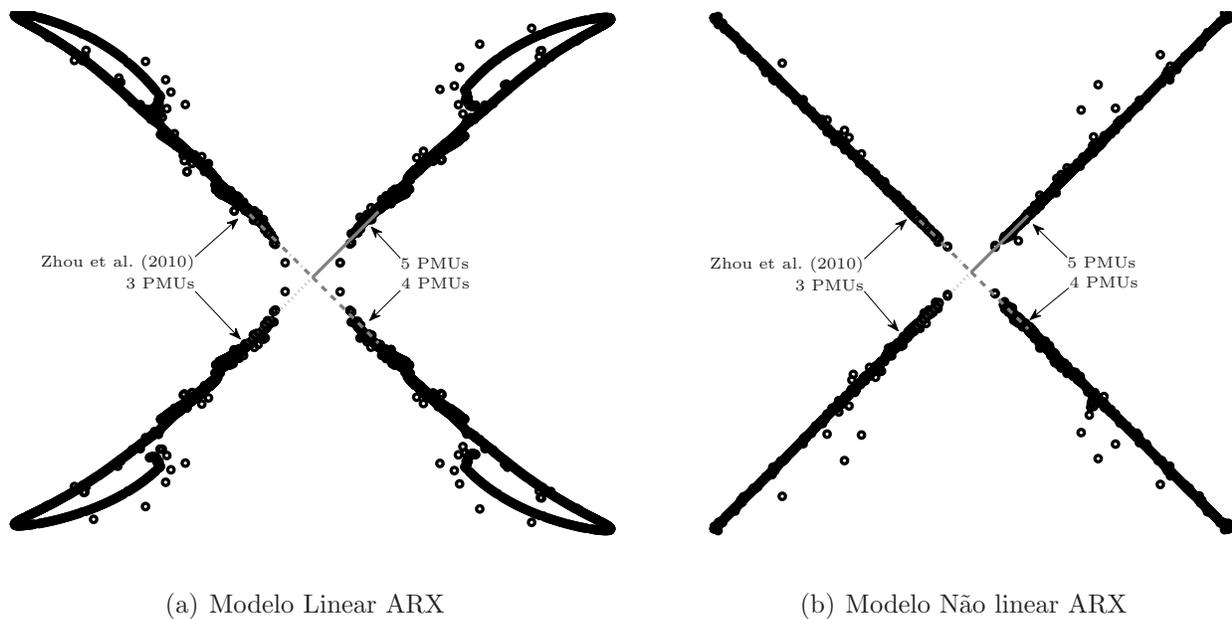


Figura 5.33: Correlações - critério do Fator de Participação Modal Reativo

5.4.5 Resultados Considerando o critério TVE e ruído

A seguir serão apresentados os resultados referentes à aplicação da ferramenta de estimação de margem proposta nesta tese considerando a inserção de um ruído aleatório de forma a contaminar as medidas e simular uma situação de uma PMU que atenda o quesito de TVE da norma (IEEE Power Engineering Society, 2011a).

Para simular o ruído, somou-se aos fasores de tensão utilizados para validar o método um fasor que possui uma magnitude de valor aleatório menor ou igual ao valor de TVE definido pela norma e um valor de fase também aleatório compreendido no intervalo -2π a 2π .

Desta forma cada fasor utilizado como dado de entrada do modelo de estimação é calculado da seguinte forma:

$$\vec{V}(k) = \vec{V}(k) + m(k) * \exp(j * t(k)) \quad (5.5)$$

Em que $\vec{V}(k)$ é o fasor medido a ser utilizado como dado de entrada no instante k , $m(k)$ é a magnitude do fasor que representa o ruído que é calculado aleatoriamente dentro do intervalo $[1.10^{-9}$ a $1.10^{-2})$ e $t(k)$ é o valor da fase aleatória do fasor de ruído cujo valor está dentro do intervalo -2π a 2π .

Observando a equação (5.5), pode se observar que os fasores $\vec{V}(k)$ possuem um desvio aleatório de seu valor original cuja magnitude é menor que o limite estabelecido pelo critério TVE. Dessa forma, espera-se que sua utilização como entrada do modelo do estimador represente as leituras de uma PMU que atenda tal critério.

As Figuras 5.34 e 5.35 mostram as magnitudes e ângulos de fases dos fasores utilizados como entrada do modelo de estimação, antes e depois da aplicação. Nos gráficos os fasores mostrados são das barras selecionadas pelo critério de variância e é possível notar como as medidas tanto de magnitude como de ângulo ficam ao se adicionar o ruído.

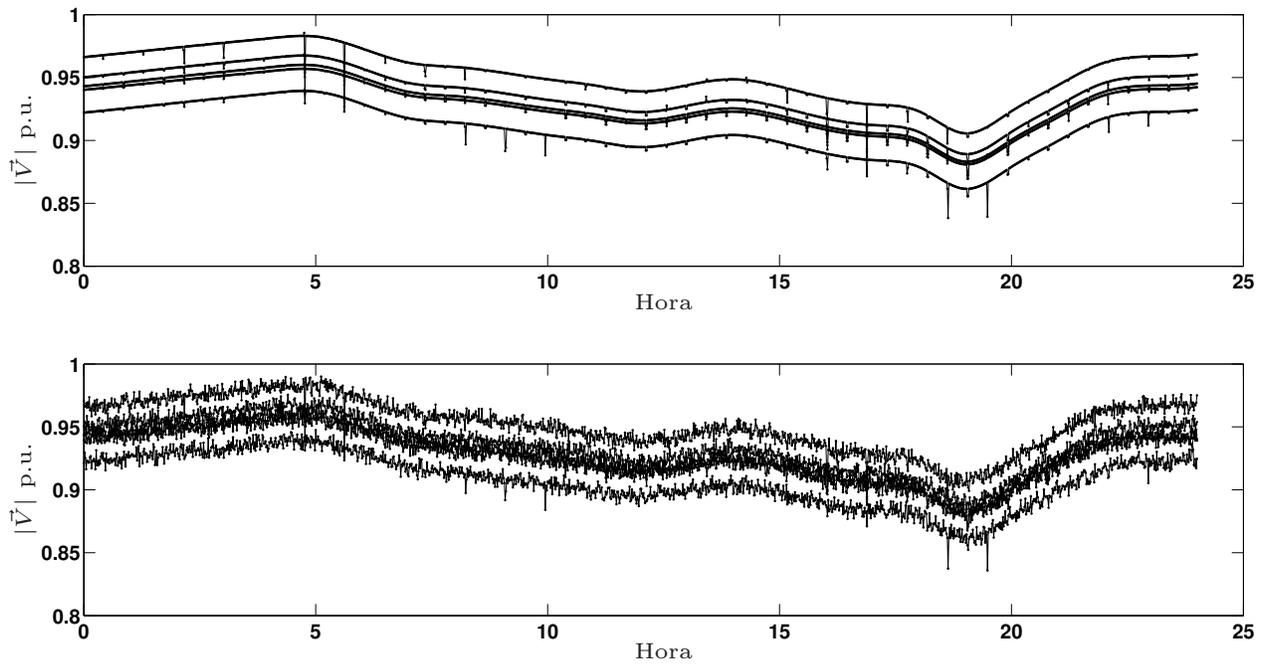


Figura 5.34: Magnitudes das tensões antes e após a aplicação do ruído barras(15,4,8,12,7)

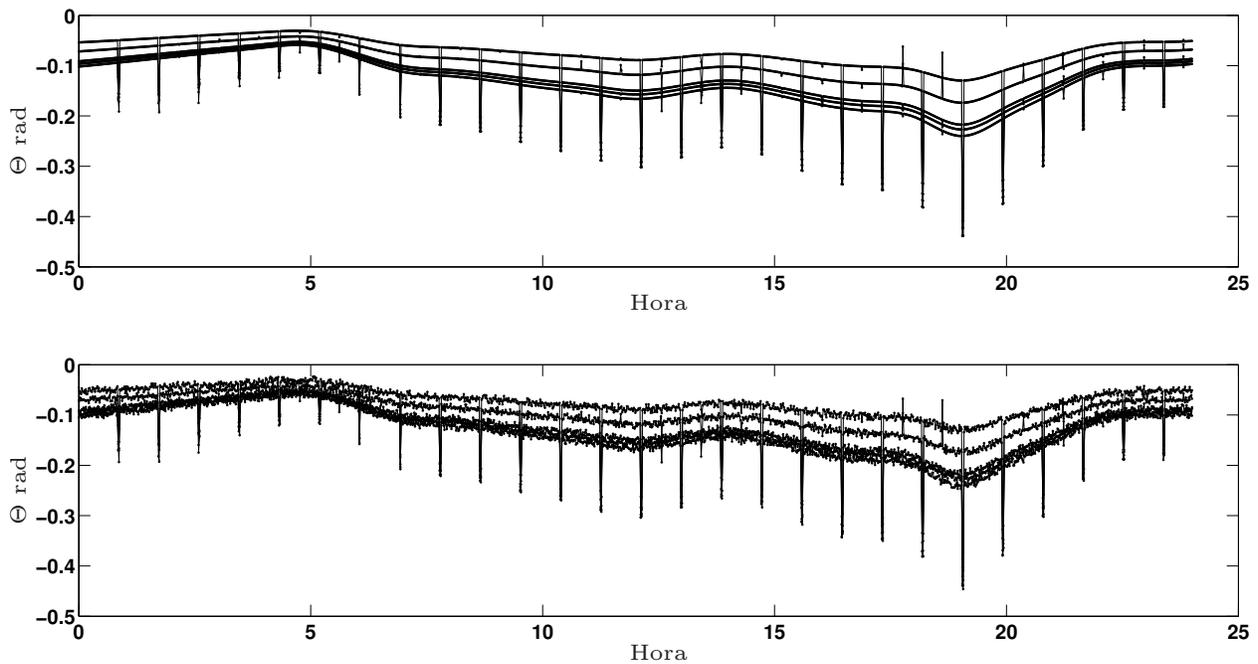


Figura 5.35: Ângulos das tensões antes e após a aplicação do ruído - barras(15,4,8,12,7)

Para os testes considerando o critério TVE, as medidas ruidosas foram alimentadas aos modelos de estimação da margem e a mesma análise de erro entre as margens calculada pelas curvas PV e estimadas pelos modelos foram analisadas. Os modelos obtidos com os dois critérios foram utilizados sem nenhuma mudança em seus parâmetros.

A Figura 5.36 apresenta as margens obtidas utilizando o modelo não linear ARX, com PMUs alocadas nas barras selecionadas pelo critério de FPA e FPR combinados, e um valor de TVE $\leq 1\%$. Analisando-se o gráfico pode se notar que com a inclusão do ruído nas medidas, o método de estimação com modelo não linear perdeu muita precisão, não apresentando resultados satisfatórios.

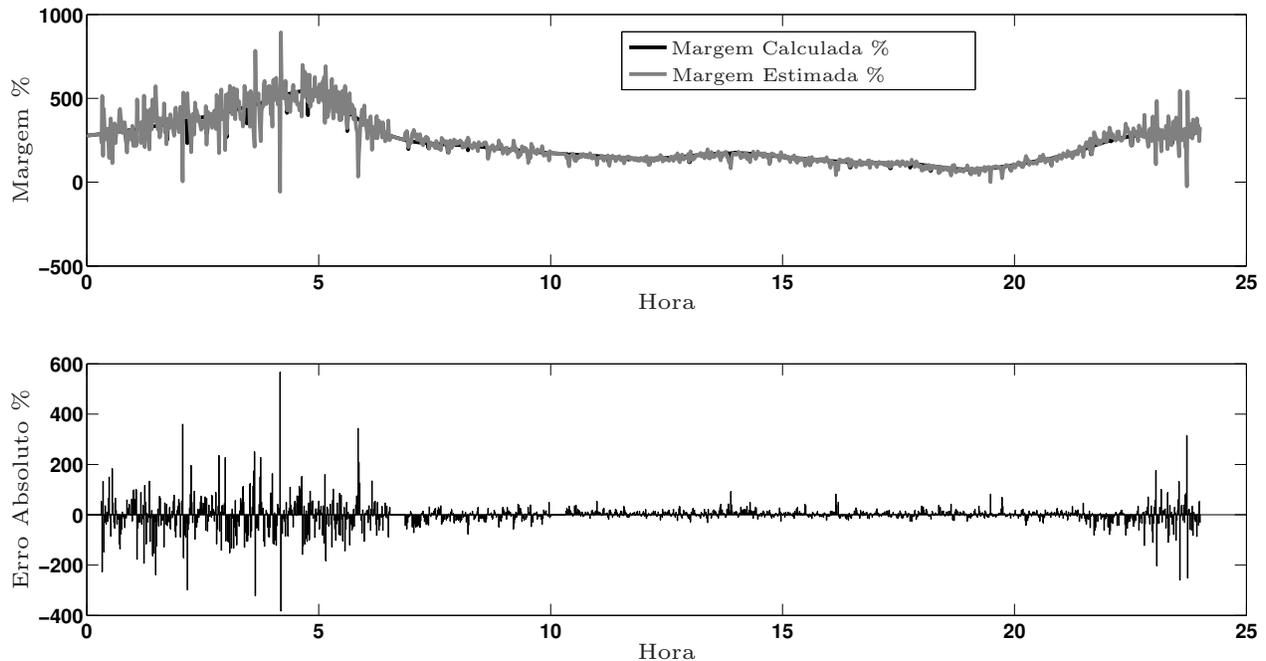
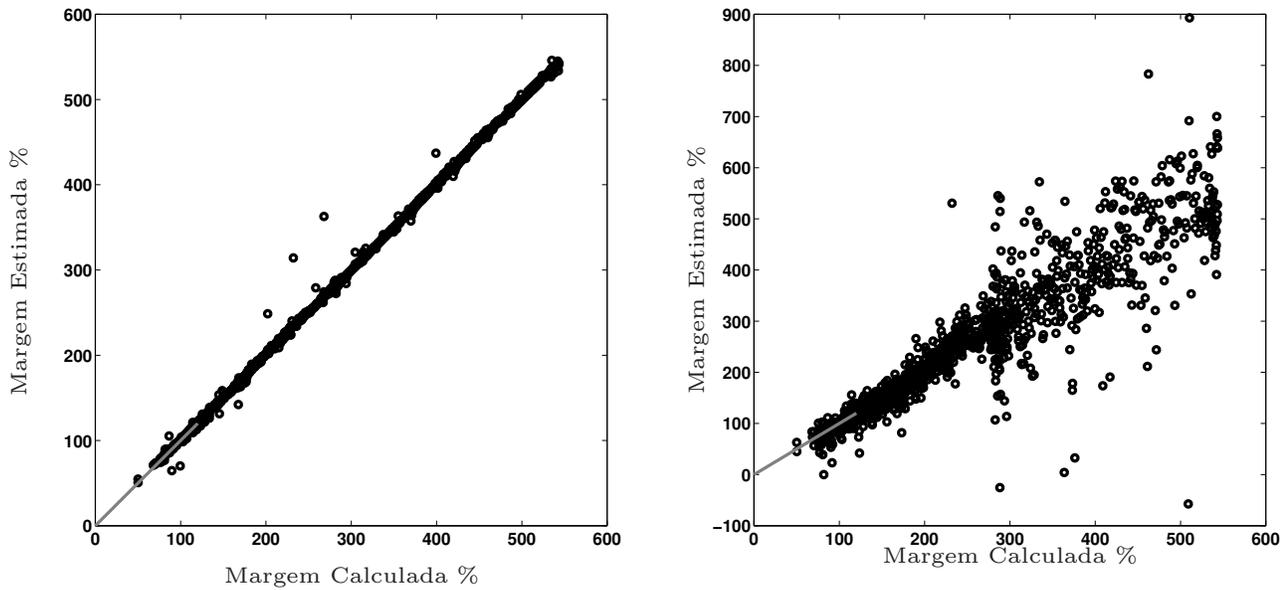


Figura 5.36: Margens considerando o TVE - modelo não linear - FPA+FPR (27,7,12,14,26)

As Figuras 5.37(a) e 5.37(b) mostram os gráficos das correlações entre as margens estimadas e calculadas para a estimação considerando o modelo não linear e as barras do critério FPA combinado com FPR, com e sem o ruído à título de comparação, e é possível notar a pouca correlação que há entre os valores das margens no caso com ruído principalmente para valores de margem maiores.



(a) Critério FPA+FPR barras (27,7,12,14,26) sem ruído

(b) Critério FPA+FPR barras (27,7,12,14,26) com ruído

Figura 5.37: Comparações com e sem ruído - modelo não linear

Considerando a alocação de PMUs utilizando o critério de variância e o modelo não linear para o estimador, o mesmo procedimento para avaliar o efeito do ruído na estimativa da margem foi realizado e os resultados podem ser vistos na Figura 5.38. Analisando-se o gráfico pode-se notar que o resultado alocando as barras pelo esquema de variância não produziu resultados satisfatórios, inclusive piores que os resultados alocando pelo esquema de FPA e FPR.

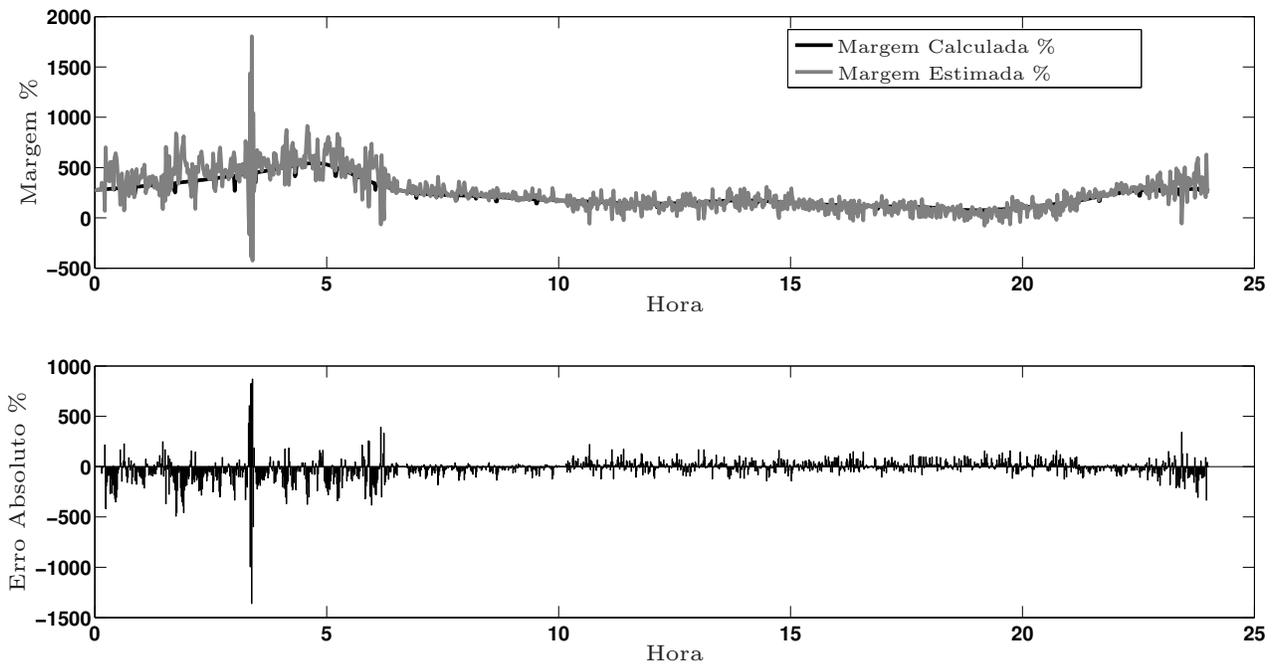
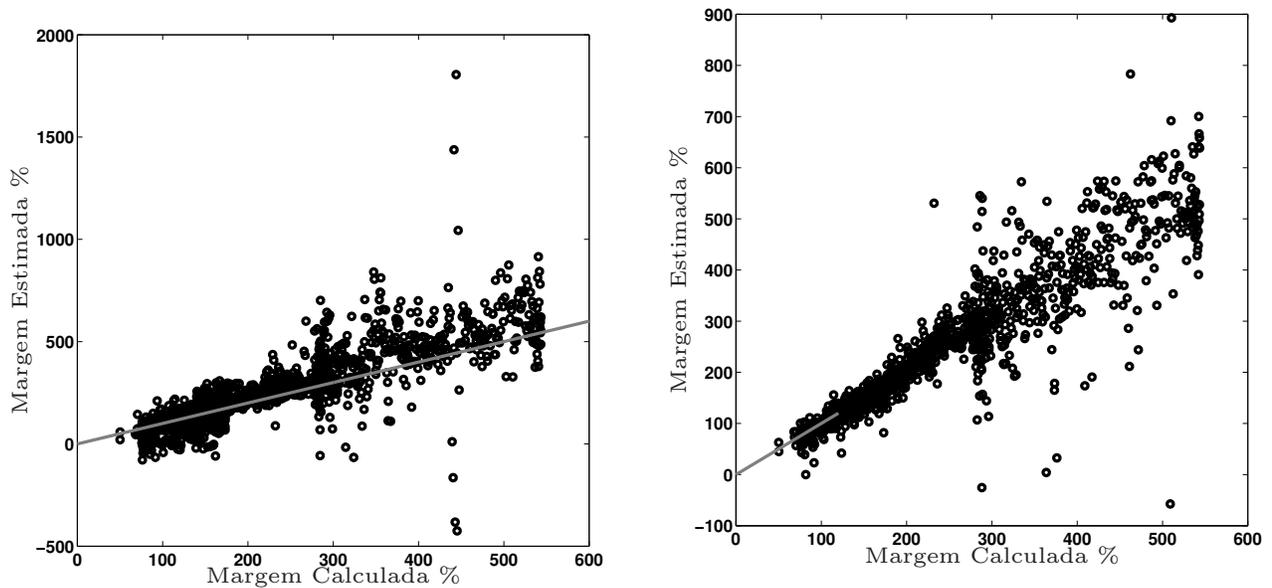


Figura 5.38: Margens considerando o TVE - modelo não linear - Variância(15,4,8,12,7)

A título de comparação as Figuras 5.39(a) e 5.39(b) mostram os gráficos de correlações considerando os dois esquemas de alocação de PMUS. O esquema considerando as variâncias e o esquema considerando uma combinação dos FPAs e FPRs. Analisando-se os gráficos, pode-se notar mais claramente que o método de alocação de PMUs pelo fator de participação se mostrou mais robusto em relação à presença do ruído na entrada do estimador, resultando em margens estimadas mais correlacionadas com as calculadas.



(a) Critério Variância barras (15,4,8,12,7) com ruído

(b) Critério FPA+FPR barras (27,7,12,14,26) com ruído

Figura 5.39: Comparações entre as correlações - modelo não linear

Os resultados insatisfatórios dos estimadores levantaram um questionamento a respeito dos valores máximos adotados pela norma para o TVE em regime permanente, apresentados na Tabela 4.2. De acordo com a norma o máximo valor admissível para o TVE deve ser de 1% para fins de medição em regime permanente. Entretanto, 1% de TVE considerando que não haja erro no valor da fase, acarretaria em um desvio na magnitude de tensão de 0,01 p.u.. Do ponto de vista de análise de estabilidade utilizando curvas PV, um erro no valor da magnitude da tensão de 0,01 p.u. poderia ocasionar em um erro inaceitável no valor do parâmetro λ e conseqüentemente um erro no valor da margem.

Com base nesta observação, testou-se o estimador com os dois critérios, considerando o ruído aleatório para representar o TVE, entretanto o valor máximo foi reduzido para a metade, ou seja, 0,5% e depois para 0,1%. Os resultados para as margens e os erros absolutos podem ser vistos no gráfico da Figura 5.40 em que se utilizou o esquema de alocação por variância, estimador com modelo não linear e um máximo valor de TVE de 0,5%. Neste teste o estimador apresentou resultados melhores quando comparados com o caso de $TVE \leq 1\%$, mas ainda assim inadequados para o monitoramento.

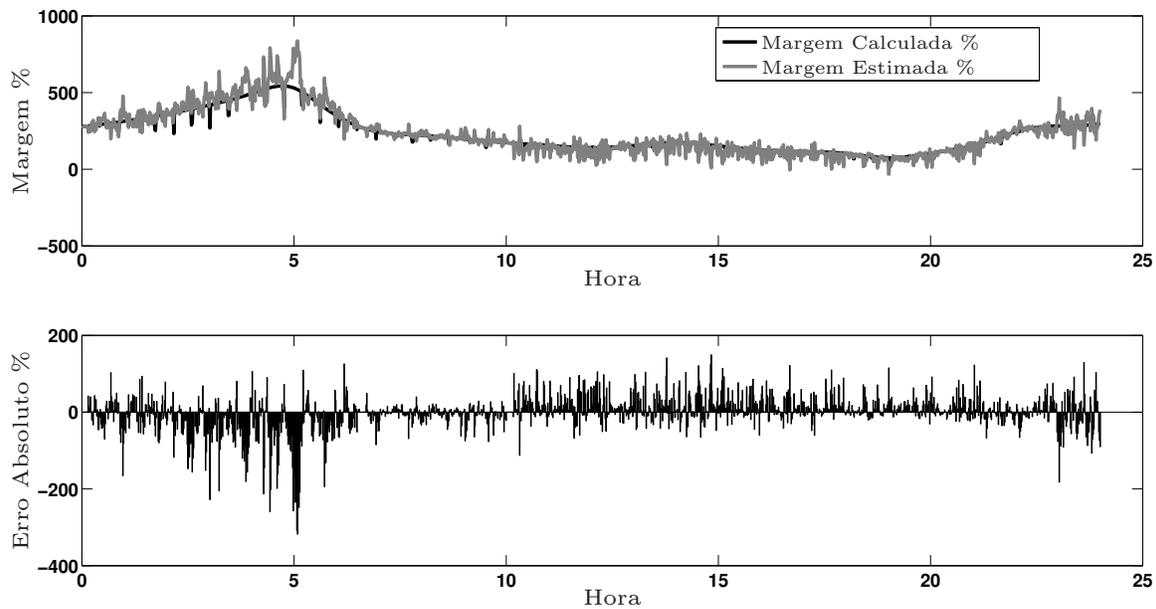


Figura 5.40: Margens considerando o TVE de 0,5% - modelo não linear - Variância(15,4,8,12,7)

A Figura 5.41 apresenta as margens considerando agora o esquema de alocação por FPA e FPR combinados, estimador com modelo não linear e máximo valor de TVE de 0,5%. As margens estimadas no esquema de alocação utilizando os fatores de participação também mostraram resultados melhores ao se reduzir o valor máximo de TVE, sem grandes diferenças na melhoria em relação à alocação por variância.

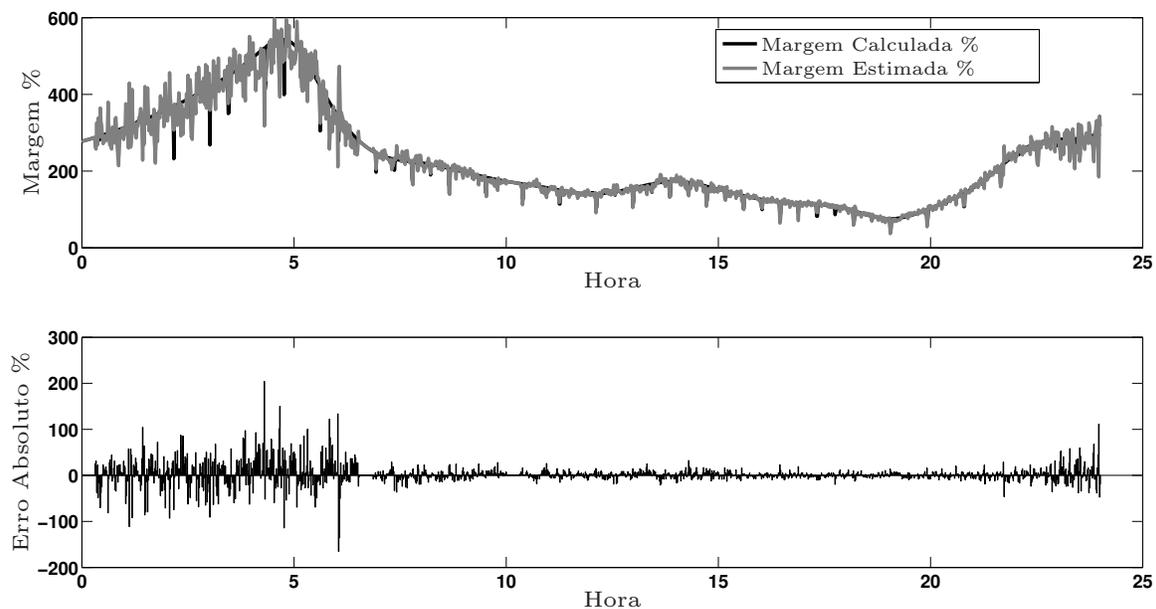
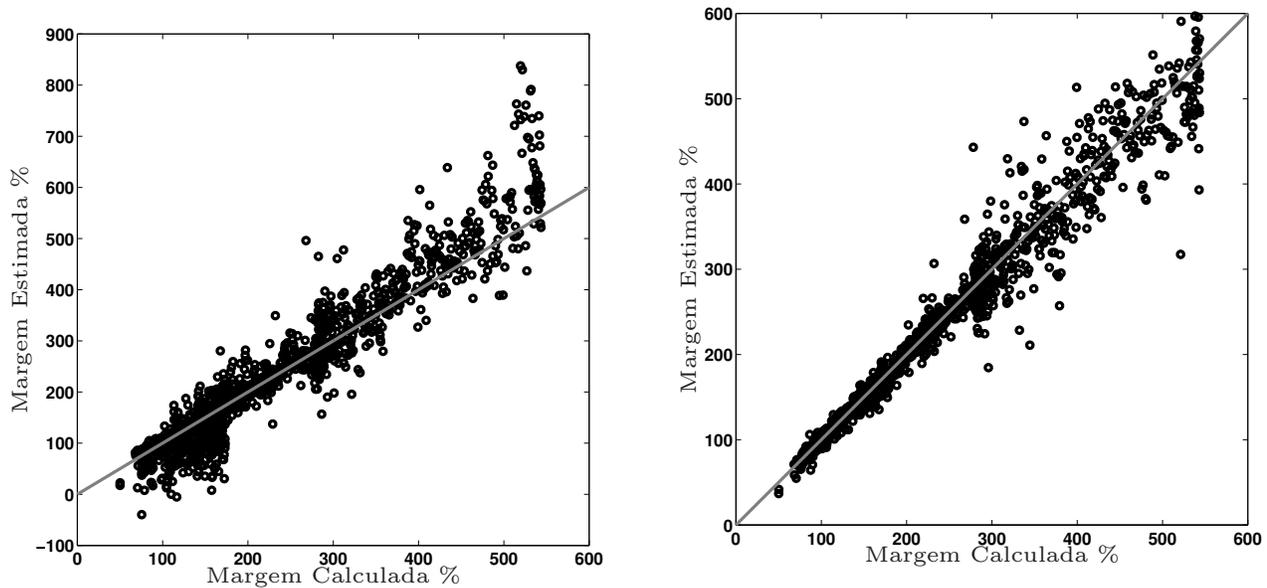


Figura 5.41: Margens considerando o TVE de 0,5% - modelo não linear - FPA + FPR(27,7,12,14,26)

A seguir as Figuras 5.42(a) e 5.42(b) apresentam os gráficos de correlação dos dois testes acima citados em que é possível confirmar visualmente a melhoria da estimação ao se reduzir o máximo valor de TVE.

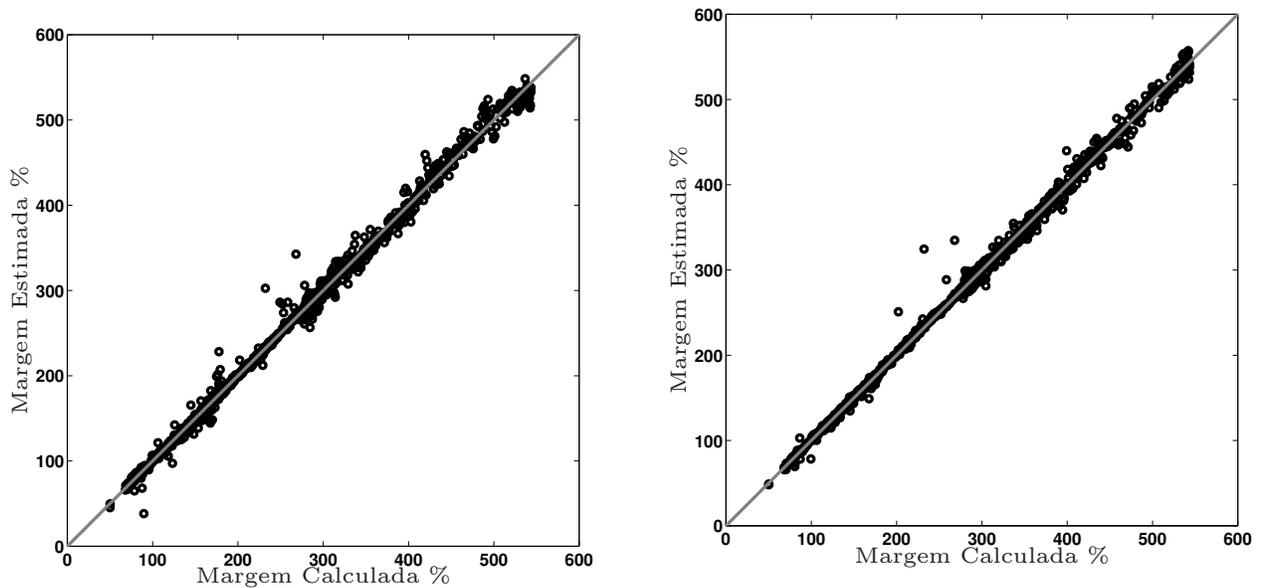


(a) Critério Variância barras (15,4,8,12,7) com ruído

(b) Critério FPA+FPR barras (27,7,12,14,26) com ruído

Figura 5.42: Comparações entre as correlações com $TVE \leq 0,5\%$ - modelo não linear

Para confirmar a hipótese de que a diminuição do valor máximo de TVE traria melhorias na qualidade da estimação testamos os estimadores considerando $TVE \leq 0,1\%$, as Figuras 5.43(a) e 5.43(b) apresentam os gráficos de correlação para os dois esquemas de alocação de PMUS, ambos com o modelo não linear de estimador. Uma análise dos gráficos de correlações permite verificar que para um valor máximo de $TVE \leq 0,1\%$, é possível obter boas estimativas para a MET utilizando a metodologia proposta nesta tese.



(a) Critério Variância barras (15,4,8,12,7) com ruído

(b) Critério FPA+FPR barras (27,7,12,14,26) com ruído

Figura 5.43: Comparações entre as correlações com $TVE \leq 0,1\%$ - modelo não linear

A análise realizada nesta seção permite concluir por verificação que os valores adotados para o máximo TVE de 1% na medição em regime permanente não seria razoável para a aplicação da metodologia proposta. Estudou-se também como uma diminuição do máximo valor de TVE afetaria a estimativa da MET, verificando-se que a mesma pode atingir níveis adequados de qualidade ao se reduzir o máximo valor de TVE.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusões a respeito dos resultados obtidos

Esta tese apresenta os resultados da utilização de um método de identificação paramétrica de sistemas capaz de retornar um valor estimado para a margem de estabilidade de tensão, em tempo real, tendo como entradas as medidas obtidas por unidades de medição fasorial estrategicamente alocadas na rede de transmissão.

Para o cálculo dos parâmetros do estimador da margem, foi construído um banco de dados, em estágio off-line, contendo vários cenários de contingências e carregamento. Para isso, foi utilizado um conjunto de curvas de carga diárias, divididas em três patamares, bem como uma extensa lista de contingências simples, na tentativa de cobrir os mais diversos cenários operativos da rede. Para modelar o estimador de margem foi utilizado, inicialmente, um modelo linear denominado ARX. Este modelo utiliza um polinômio cuja ordem e parâmetros foram obtidos a partir do banco de dados previamente construído.

O modelo linear encontrado não apresentou resultados satisfatórios para a estimativa da margem de estabilidade de tensão em nenhum patamar, principalmente para o patamar de carga leve. Além do modelo linear, os parâmetros de um modelo ARX não linear também foram calculados para os três patamares de carga apresentando resultados satisfatórios em relação à precisão e rapidez para a estimativa do valor da margem em tempo real.

Foi realizada uma análise considerando dois critérios para a alocação das PMUs na rede elétrica, tendo por objetivo a melhoria da estimativa da margem de estabilidade de tensão pelo método

proposto utilizando um número reduzido de medidores. Os dois critérios se mostraram bastante robustos, e ainda permitiram concluir que os efeitos de uma redução no número de medidores provocaria pequeno impacto na qualidade da estimativa da margem. Nesta tese, considerou-se que as medidas das PMUs que serviram de entrada para o modelo de estimação da margem já haviam passado por um processo de diminuição de erros de medidas pois o objetivo principal foi a verificação da aplicabilidade do método proposto e não sua robustez com relação a imprecisões das medidas obtidas pelas PMUs.

Diversos testes e simulações foram executados no sistema teste do IEEE de 39 barras de forma a validar a metodologia proposta. Os resultados mostram que o método proposto apresenta uma boa precisão na estimativa da margem. O fato desta estimativa necessitar de operações relativamente simples sobre os valores medidos e não em cálculos de diversas curvas PV, é um forte indício de que o método é rápido o suficiente para ser implementado em tempo real.

O estimador de margem apresentou resultados insatisfatórios quando foi utilizado com entradas contendo um ruído dentro dos limites definidos pela norma. Entretanto ao se restringir o máximo valor estabelecido pela norma para o TVE, o estimador considerando ambos os critérios de alocação de PMUs apresentou resultados adequados. Os valores adotados pela norma de TVE $\leq 1\%$ analisados sobre o prisma de análise de estabilidade de tensão utilizando curvas PV é inadequado. Isto pode ser explicado pela natureza não linear da curva PV que, dependendo do sistema e da condição de carregamento, pode apresentar mudanças abruptas do valor da magnitude de tensão nas proximidade do ponto de colapso de tensão. Além disso, nas partes da curva em que a mesma possui características mais planas, uma variação na magnitude da tensão de 0,01 p.u. correspondente a um TVE de 1% considerando erro nulo no valor da fase pode implicar em erros inaceitáveis no valor do carregamento e conseqüentemente no valor da margem.

6.2 Possibilidades de trabalhos futuros

As principais possibilidades de trabalhos futuros podem ser listadas como se segue:

- Inclusão da informação a respeito das reservas de reativos dos principais geradores como entrada do estimador. Como observado nos resultados, a presença de barras PV importantes no sistema pode conduzir a erros na estimação da margem uma vez que o estimador não possui

informações das reservas de reativos que mantêm a magnitude da tensão nessas barras.

- Inclusão da informação a respeito das aberturas angulares dos principais corredores de transmissão. Este item pode ser importante pois em algumas redes o problema de estabilidade de tensão pode se iniciar pelo esgotamento de capacidade de transmissão de potência ativa em linhas importantes, que poderia afetar fortemente o valor da margem.
- Desenvolvimento de métodos de identificação das melhores ações preventivas e corretivas para a melhoria da MET em tempo real. O trabalho desenvolvido nesta tese diz respeito a uma ferramenta de monitoramento que poderia ser incluída num pacote computacional que não somente monitorasse a estabilidade de tensão, mas que também pudesse auxiliar na indicação de quais ações o operador poderia tomar em uma dada situação.
- Aplicar a metodologia proposta em uma rede real de grande porte, recebendo dados reais de PMUs através de um projeto de pesquisa e desenvolvimento.

6.3 Trabalhos desenvolvidos durante o doutorado.

- 1) ANZAI, A. H. ; DA SILVA, L. C. P., Utilização De Modelos Auto-Regressivos e Medidas De PMUs Para Estimar a Margem De Estabilidade De Tensão em Tempo Real, submetido para Revista Controle & Automação, da SBA, 2012.
- 2) ANZAI, A. H. ; DA SILVA, L. C. P. . Estimacão da margem de estabilidade de tensão em tempo real usando modelos auto-regressivos e medidas de PMUs. In: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012, Goiânia, Goiás. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.
- 3) Rezende, R. ; Murari, C. A. F. ; DA SILVA, L. C. P. ; ANZAI, A. H. . Aplicaco de Lógica Nebulosa no Monitoramento em Tempo Real da Estabilidade de Tensão. In: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012, Goiânia, Goiás. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.
- 4) ANZAI, A. H. ; DA SILVA, L. C. P. ; FREITAS FILHO, Walmir de ; De Almeida M. C. . Real time voltage stability margin estimation using auto-regressive models and PMUs. In: Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, 2011, Detroit. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, 2011. p. 1-8.
- 5) DA SILVA, L. C. P. ; FRANCA, A. L. M. ; ANZAI, A. H. ; MEIRA, P. C. ; FREITAS FILHO, Walmir de . Análise de estabilidade de tensão em tempo real utilizando dados de PMUs. In: XX Seminário Nacional de produo e transmissão de energia elétrica XX SNPTEE, 2009, Recife. Anais do XX Seminário Nacional de produo e transmissão de energia elétrica, 2009.
- 6) ARAUJO, R. A. ; ANZAI A. H. ; De Almeida, M.C. . Algoritmo Genético de Chu e Beasley aplicado ao planejamento da operao de redes de distribuo com geradores distribuídos. In: XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operao e Expansão Elétrica, 2012, Rio de Janeiro - RJ. Anais do XII SEPOPE, 2012. v. 1. p. 1-6.

Bibliografia

- Abbasy, N.H. & Ismail, H.M., 2009; “A Unified Approach for the Optimal PMU Location for Power System State Estimation.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 24**, no. 2:pgs. 806 –813, ISSN 0885-8950, doi:10.1109/TPWRS.2009.2016596.
- Abed, Abbas M., 1999; “WSCC voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology.” *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, **vol. 1**:pgs. 191–197, URL <http://dx.doi.org/10.1109/PSS.1999.784345>.
- Affonso, C. M., da Silva, L. C. P., Lima, F. G. M. & Soares, S., “Optimal MW/MVAR dispatch and minimal load shedding strategy for improving voltage stability margin.” Em *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2 (2003), doi:10.1109/PES.2003.1270426.
- Aguirre, Luis Antonio, *Introdução à identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais 3. Edição Revista e Ampliada* (Editora UFMG, 2007), ISBN 978–85–7041–584–4.
- Ajjarapu, V. & Christy, C., 1992; “The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 7**, no. 1:pgs. 416–423.
- Ajjarapu, Venkataramana, *Computational Techniques for voltage Stability Assessment and Control* (Springer, 2006).
- Alves, D. A., da Silva, L. C. P., Castro, C. A. & da Costa, V. F., “Modified Newton and fast decoupled load flows for tracing power systems bifurcation diagrams.” Em *Proc. Int. Conf. Electric Power Engineering PowerTech Budapest 99* (1999a), doi:10.1109/PTC.1999.826714.
- Alves, D. A., da Silva, L. C. P., Castro, C. A. & da Costa, V. F., “Parameterized fast decoupled

- load flow for tracing power systems bifurcation diagrams.” Em *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pgs. 708–713 (1999b), doi:10.1109/PCESS.1999.787404.
- Alves, D. A., de Silva, L. C. P., Castro, C. A. & da Costa, V. F., “Continuation load flow method parameterized by transmission line power losses.” Em *Proc. Int. Conf. Power System Technology PowerCon 2000*, vol. 2, pgs. 763–768 (2000a), doi:10.1109/ICPST.2000.897118.
- Alves, D. A., da Silva, L. C. P., Castro, C. A. & da Costa, V. F., “Continuation method parameterized by power losses.” Em *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pgs. 1123–1128 (2000b), doi:10.1109/PESW.2000.850098.
- Alves, D. A., da Silva, L. C. P., Castro, C. A. & da Costa, V. F., “New parameterization schemes for the continuation load flow method.” Em *Proc. Int. Conf. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies DRPT 2000*, pgs. 179–184 (2000c), doi:10.1109/DRPT.2000.855660.
- Alves, D. A., da Silva, L. C. P., Castro, C. A. & da Costa, V. F., 2003; “Continuation fast decoupled power flow with secant predictor.” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3: pgs. 1078–1085, doi:10.1109/TPWRS.2003.814892.
- An, Tianyu & Zhou, Suquan, “Practical PMU configuration based on weak voltage area monitoring and incomplete observability.” Em *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting* (2006), doi:10.1109/PES.2006.1708858.
- Arones, Manfred Fritz Bedriñana, 2010; *Desenvolvimento de uma metodologia Robusta e eficiente para fluxo de carga da continuação ótimo multiobjetivo*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação- FEEC - UNICAMP.
- Bedoya, D., Bedrinana, M. F., Castro, C. A. & da Silva, L. C. P., “Power system critical areas by using sensitivities and participation factors for online applications.” Em *Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition: Latin America*, pgs. 1–6 (2008), doi:10.1109/TDC-LA.2008.4641789.
- Bonnans, J. F., Gilbert, J. Ch., Lemaréchal, C. & Sagastizábal, C. A., *Numerical Optimization, theoretical and numerical aspects*. (Springer, 2006), 2nd edição.

- Candy, James V., *Model-Based Signal Processing* (JOHN WILEY & SONS, INC, New Jersey, United States of America, 2006), ISBN -13 978-0-471-23632-0 -10 0-471-23632-2.
- Canizares, C. A., 1995a; “On bifurcations, voltage collapse and load modeling.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 10**, no. 1:pgs. 512–522.
- Canizares, Claudio A., 1995b; “Conditions for saddle-node bifurcations in ac/dc power systems.” *Journal of electric Power and Energy Systems*, pgs. 61–68.
- Chakrabarti, S. & Kyriakides, E., 2009; “PMU Measurement Uncertainty Considerations in WLS State Estimation.” *Power Systems, IEEE Transactions on*, **vol. 24**, no. 2:pgs. 1062–1071, ISSN 0885-8950, doi:10.1109/TPWRS.2009.2016295.
- Chong, A.Z.S., Wilcox, S.J. & Ward, J., 2001; “Prediction of gaseous emissions from a chain grate stoker boiler using neural networks of ARX structure.” *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -*, **vol. 148**, no. 3:pgs. 95–102, ISSN 1350-2344, doi:10.1049/ip-smt:20010382.
- Corsi, Sandro & Taranto, Glauco N., 2008; “A Real Time Voltage instability identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 23 Issue 3**:pgs. 1271–1279, URL <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2008.922586>.
- da Costa, V. F. & da Silva, L. C. P., “Voltage stability including detailed induction motor models.” *Em Proc. Midwest Symp. Circuits and Systems*, pgs. 203–206 (1998).
- Cutsem, Thierry Van & Vournas, Costas, *Voltage Stability of Electric Power Systems* (Springer, 1998).
- Da Silva, L. C. P., Da Costa, V. F. & XU, W., 2001; “Power system voltage stability assessment using enhanced power flow models.” *Electric Power Components and Systems No 3*, **vol. 29**:pgs. 349–360, URL <http://dx.doi.org/10.1080/15325000151125658>.
- Davidon, William C., 2006; “Variable METric Method for Minimization.” *SIAM Journal on Optimization*, **vol. 1**, no. 1:pgs. 1–17, doi:10.1137/0801001.
- Dobson, Ian, “The irrelevance of load dynamics for the loading margin to voltage collapse and its sensitivities.” *Em Sensitivities in [29*, pgs. 509–518 (1994).

- Espinoza, Marcelo, Suykens, Johan A.K., Belmans, Ronnie & Moor, Bart De, 2007; “Electric Load Forecasting.” *Control Systems Magazine, IEEE*, **vol. 27**, no. 5:pgs. 43–57, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MCS.2007.904656>.
- Faria, Bruno Guedes, 2005; *Identificação Dinâmica Longitudinal de um Dirigível Robótico Autônomo*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Fletcher, Roger, *Practical methods of Optimization* (John Wiley & Sons inc., New York, 1987), 2nd edição.
- Gao, B., Morison, G. K. & Kundur, P., 1992; “Voltage stability evaluation using modal analysis.” *Power Systems, IEEE Transactions on*, **vol. 7**, no. 4:pgs. 1529–1542, doi:10.1109/59.207377.
- Garcia-Valle, Rodrigo, da Silva, Luiz Carlos Pereira & Nielsen, Arne Hedje, 2009; “On-Line Voltage Stability Assessment based on PMU Measurements.” *IET International Conference on Advances in Power System Control – APSCOM 8*.
- Gavin, Henri, 2011; “The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems.” *Digital document*, URL www.duke.edu/~hpgavin/ce281/lm.pdf.
- Ghasemi, Hassan, Cañizares, Claudio A. & Reeve, John, 2004; “Prediction of Instability Points Using System Identification.” *Proceedings of Bulk Power System Dynamics and Control VI*, pgs. 105–110.
- Goodwin, Graham C. & Payne, Robert L., *Dynamic system Identification Experiment Design and Data Analysis*, vol. 136 (Academic Press Inc., 1977).
- Hall, Glen R., Devaney, Robert L. & Blanchard, Paul, *Differential Equations* (Thomson Learning, 2006).
- Hashimoto, S., Hara, K., Funato, H. & Kamiyama, K., 2001; “AR-based identification and control approach in vibration suppression.” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, **vol. 37**, no. 3:pgs. 806–811, ISSN 0093-9994, doi:10.1109/28.924762.
- van der Heijden, F., Duin, R.P.W., de Ridder, D. & Tax, D.M.J., *Classification, Parameter Estimation and State Estimation: An Engineering Approach using MATLAB* (John Wiley & Sons inc., 2004).

- Herpe, Tom Van, Espinoza, Marcelo, Pluymers, Bert, Smet, Pieter Wouters and Frank De, den Berghe, Greet Van & Moor, Bart De, “Development Of a Critically Ill Patient Input-Output Model.” Em *14th IFAC Symposium on System Identification*, pgs. 481–486 (Newcastle, Australia, 2006).
- IEEE Power Engineering Society, IEEE:, 1995; “IEEE Std 1344-1995(R2001) IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.” *IEEE Std 1344-1995(R2001)*, pg. i, doi: 10.1109/IEEESTD.1995.93278.
- IEEE Power Engineering Society, IEEE:, 2006; “C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995) IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.” *IEEE Std C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995)*, pgs. 1–57, doi:10.1109/IEEESTD.2006.99376.
- IEEE Power Engineering Society, IEEE:, 2011a; “IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005) IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.” *IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, pgs. 1 –61, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111219.
- IEEE Power Engineering Society, IEEE:, 2011b; “IEEE Std C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005) IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems.” *IEEE Std C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, pgs. 1 –53, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111222.
- IEEE Power System Relaying Committee, Working Group K12, Substation Protection Subcommittee, 1996; “Voltage Collapse Mitigation Report to IEEE Power System Relaying Committee.” Relatório técnico, IEEE Power System Relaying Committee, URL www.pes-psrc.org/Reports/Voltage%20Collapse%20Mitigation.pdf.
- IEEE/CIGRE, Joint Task Force on Stability, Terms and Definitions, 2004; “Definition and Classification of Power System Stability.” *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. VOL. 19 NO. 2: pgs. 1387–1401.
- Jimenez, C. A. & Castro, C. A., “Voltage stability security margin assessment via artificial neural networks.” Em *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, pgs. 1 – 7 (2005), doi: 10.1109/PTC.2005.4524649.

- Jolliffe, I. T., *Principal Component Analysis*, vol. 28 de *Springer Series in Statistics* (Springer, 2002), 2nd ed edição.
- Juditsky, Anatoli, Hjalmarssona, Hakan, Benveniste, Albert, Delyon, Bernard, Ljung, Lennart, Sjöberg, Jonas & Zhang, Qinghua, 1995; “Nonlinear Black-box Models in System Identification: Mathematical Foundations.” *Automatica*, **vol. 31**, no. 12:pgs. 1725–1750.
- Jurado, F. & Cano, A., 2004; “Use of ARX algorithms for modelling micro-turbines on the distribution feeder.” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, **vol. 151**, no. 2:pgs. 232 – 238, ISSN 1350-2360, doi:10.1049/ip-gtd:20040096.
- Kamwa, I., Samantaray, S. R. & Joos, G., 2012; “Compliance Analysis of PMU Algorithms and Devices for Wide-Area Stabilizing Control of Large Power Systems.” *Power Systems, IEEE Transactions on*, **vol. PP**, no. 99:pgs. 1 –13, ISSN 0885-8950, doi:10.1109/TPWRS.2012.2221168.
- Kamwa, Innocent, Béland, Jean & McNabb, Danielle, 2007; “PMU-based Vulnerability Assessment Using Wide-Area Severity Indices and Tracking Modal Analysis.” *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE06, IEEE PES*, pgs. 139–149, doi:10.1109/PSCE.2006.296288.
- Keesman, Karel J., *System Identification*, vol. XXVI (Springer, 2011), doi:10.1007/978-0-85729-522-4.
- Kessel, P. & Glavitsch, H., 1986; “Estimating the Voltage Stability of a Power System.” *IEEE Transactions on Power Delivery, No. 3,*, **vol. PWRD-1**.
- Kopcak, I., da Silva, L. C. P. & da Costa, V. F., “A Generalized Load Flow Method to Assess Steady-State Equilibrium of Power Systems.” Em *Proc. IEEE Power Engineering Society Conf. and Exposition in Africa PowerAfrica '07*, pgs. 1–7 (2007).
- Kopcak, I., da Silva, L. C. P., da Costa, V. F. & Naturesa, J. S., “Transmission systems congestion management by using modal participation factors.” Em *Proc. IEEE Bologna Power Tech*, vol. 2, pg. 6pp. Vol. 2 (2003), doi:10.1109/PTC.2003.1304280.
- Kopcak, Igor, 2007; *Uma plataforma unificada para análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

- Kundur, P., *Power System Stability and Control* (McGraw-Hill Inc, 1994).
- Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Cañizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T. & Vittal, V., 2004; “Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions.” *Power Systems, IEEE Transactions on*, **vol. 19**, no. 3:pgs. 1387 – 1401, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- Leonardi, B. & Ajarapu, V., 2010; “Development of Multilinear Regression Models for Online Voltage Stability Margin Estimation.” *Power Systems, IEEE Transactions on*, **vol. PP**, no. 99:pgs. 1–10, doi:10.1109/TPWRS.2010.2050155.
- Leonardi, Bruno, Ajarapu, Venkataramana, Djukanovic, Miodrag & Zhang, Pei, “Application of Multi-linear Regression Models and Machine Learning Techniques for Online Voltage Stability Margin Estimation.” Em *VIII IREP Symposium- Bulk Power System Dynamics and Control*, pgs. 1–6 (Buzios, RJ, Brasil, 2010).
- Levenberg, K., 1944; “A method for the solution of certain non-linear problems in least squares.” *Quarterly Journal of Applied Mathematics*, **vol. II**, no. 2:pgs. 164–168.
- Liberati, Diego, Brandazza, Paolo, Casagrande, Luca, Cerini, Aleardo & Kaufman, Bernice, “Detection of transient single-sweep somatosensory evoked potential changes via principal components analysis of the Autoregressive-with-exogenous-input parameters.” Em *Engineering in Medicine and Biology Society, 1992 14th Annual International Conference of the IEEE*, vol. 6, pgs. 2454 –2455 (1992), doi:10.1109/IEMBS.1992.5761537.
- Liu, Mingsong, Zhang, Boming, Yao, Liangzhong, Han, Min, Sun, Hongbin & Wu, Wenchuan, 2008; “PMU Based Voltage Stability Analysis for Transmission Corridors.” *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008 DPRT 2008*, pgs. 1815–1820.
- Lixia, M., Muscas, C. & Sulis, S., “On the accuracy specifications of Phasor Measurement Units.” Em *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE*, pgs. 1435 –1440 (2010), ISSN 1091-5281, doi:10.1109/IMTC.2010.5488172.
- Ljung, Lennart, ; *System Identification Toolbox 7 User’s Guide*.

- Ljung, Lennart, “Perspectives on system identification.” Em *Proc. 17th IFAC World Congress* (Seoul, Korea, 2008), (Plenary session).
- Ljung, Lennart & Glad, Torkel, *Modeling of Dynamic Systems* (Prentice-Hall Inc., 1994).
- Ljung, Lennart & Gunnarsson, Svante, 1990; “Adaptation and tracking in system identification – A survey.” *Automatica*, **vol. 26**, no. 1:pgs. 7–21, ISSN 0005-1098, doi:10.1016/0005-1098(90)90154-A, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000510989090154A>.
- Long, B. & Ajarapu, V., 1999; “The sparse formulation of ISPS and its application to voltage stability margin sensitivity and estimation.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 14**, no. 3:pgs. 944–951, doi:10.1109/59.780907.
- Macii, D., Petri, D. & Zorat, A., “Accuracy of DFT-based synchrophasor estimators at off-nominal frequencies.” Em *Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2011 IEEE International Workshop on*, pgs. 19–24 (2011), doi:10.1109/AMPS.2011.6090349.
- Macii, D., Petri, D. & Zorat, A., 2012; “Accuracy Analysis and Enhancement of DFT-Based Synchrophasor Estimators in Off-Nominal Conditions.” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, **vol. 61**, no. 10:pgs. 2653–2664, ISSN 0018-9456, doi:10.1109/TIM.2012.2199197.
- Mansour, Y., Xu, Wilson, Alvarado, F. & Rinzin, Chhewang, 1994; “SVC placement using critical modes of voltage instability.” *Power Systems, IEEE Transactions on*, **vol. 9**, no. 2:pgs. 757–763.
- Marquardt, Donald W., 1963; “An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters.” *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **vol. 11**, no. 2:pgs. 431–441, doi:dx.doi.org/10.1137/0111030.
- Martin, K. & Carroll, J., 2008; “Phasing in the Technology.” *Power and Energy Magazine, IEEE*, **vol. 6**, no. 5:pgs. 24–33, ISSN 1540-7977, doi:10.1109/MPE.2008.927474.
- Martin, K.E., Hamai, D., Adamiak, M.G., Anderson, S., Begovic, M., Benmouyal, G., Brunello, G., Burger, J., Cai, J.Y., Dickerson, B., Gharpure, V., Kennedy, B., Karlsson, D., Phadke, A.G., Salj, J., Skendzic, V., Sperr, J., Song, Y., Huntley, C., Kasztenny, B. & Price, E., 2008; “Exploring the IEEE Standard C37.118–2005 Synchrophasors for Power Systems.” *Power Delivery*,

- IEEE Transactions on*, vol. **23**, no. 4:pgs. 1805–1811, doi:10.1109/TPWRD.2007.916092, ISSN = 0885–8977.
- Mikles, Jan & Fikar, Miroslav, *Process Modelling, Identification, and Control*, vol. XXVI (Springer, 2007).
- Mili, L., Baldwin, T. & Adapa, R., “Phasor measurement placement for voltage stability analysis of power systems.” *Em Proc. 29th IEEE Conf. Decision and Control*, pgs. 3033–3038 (1990), doi:10.1109/CDC.1990.203341.
- Moraes, R., Volkis, H. & Hu, Yi, 2008; “Deploying a large-scale PMU system for the Brazilian interconnected power system.” *IEEE Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pgs. 143–149, URL <http://dx.doi.org/10.1109/DRPT.2008.4523392>.
- Moraes, R. M., Hu, Y., Stenbakken, G., Martin, K., Alves, J. E. R., Phadke, A. G., Volskis, H. A. R. & Centeno, V., 2012; “PMU Interoperability, Steady-State and Dynamic Performance Tests.” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. **PP**, no. 99:pgs. 1 –10, ISSN 1949-3053, doi: 10.1109/TSG.2012.2208482.
- Nakawiro, W. & Erlich, I., “Online Voltage stability monitoring using Artificial Neural Network.” *Em Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, pgs. 941–947 (2008), doi:10.1109/DRPT.2008.4523542.
- Nelles, Oliver, *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Engineering Online Library (Springer, 2001).
- Ngia, L. S. H., Sjoberg, J. & Viberg, M., “Adaptive neural nets filter using a recursive Levenberg-Marquardt search direction.” *Em Proc. Conf Signals, Systems & Computers Record of the Thirty-Second Asilomar Conf*, vol. 1, pgs. 697–701 (1998), doi:10.1109/ACSSC.1998.750952.
- Ning, An, Shuangxi, Zhou & Lingzhi, Zhu, “Power System Voltage Stability Limits Estimation based on Quasi-Steady-State Simulation.” *Em Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, pgs. 1–7 (2006), doi:10.1109/ICPST.2006.321470.

- Nuqui, R.F. & Phadke, A.G., 2005; “Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability.” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, **vol. 20**, no. 4:pgs. 2381 – 2388, ISSN 0885-8977, doi:10.1109/TPWRD.2005.855457.
- Omidi, H., Mozafari, B., Parastar, A. & Khaburi, M. A., “Voltage stability margin improvement using shunt capacitors and active and reactive power management.” Em *Proc. IEEE Electrical Power & Energy Conf. (EPEC)*, pgs. 1–5 (2009), doi:10.1109/EPEC.2009.5420873.
- ONS - Operador Nacional do Sistema, 2011; “Procedimentos de rede - ONS: Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos.” Relatório técnico, ONS - Operador Nacional do Sistema, URL www.ons.org.br.
- Oppenheim, Alan V. & Schaffer, Ronald W., *Discrete-time signal Processing (3rd Edition)* (Prentice-Hall Inc., 2009), ISBN 978–0131988422.
- Overbye, T. J., Dobson, I. & DeMarco, C. L., 1994; “Q-V curve interpretations of energy measures for voltage security.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 9**, no. 1:pgs. 331–340, doi: 10.1109/59.317593.
- Parra, O.J.S., Martinez, N.O.D. & Puente, F.J., “Autoregressive nonlinear with exogenous input, measurement-based modeling of the round trip time using Nonlinear System Identification.” Em *New Trends in Information Science and Service Science (NISS), 2010 4th International Conference on*, pgs. 754 –759 (2010).
- Peng, Hui, Ozaki, T., Haggan-Ozaki, V. & Toyoda, Y., 2002; “A nonlinear exponential ARX model-based multivariable generalized predictive control strategy for thermal power plants.” *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, **vol. 10**, no. 2:pgs. 256 –262, ISSN 1063-6536, doi:10.1109/87.987071.
- Perrott, Michael H., 1992; *An efficient ARX Model Selection Procedure Applied to Autonomic Heart Rate Variability*. Tese de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology.
- Phadke, A. R., Bansal, S. K. & Niazi, K. R., “A Comparison of Voltage Stability Indices for Placing Shunt FACTS Controllers.” Em *Proc. First Int. Conf. Emerging Trends in Engineering and Technology ICETET '08*, pgs. 939–944 (2008).

- Phadke, A.G., “Synchronized phasor measurements—a historical overview.” Em *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, vol. 1, pgs. 476 – 479 vol.1 (2002), doi:10.1109/TDC.2002.1178427.
- Phadke, A.G. & de Moraes, R.M., 2008; “The Wide World of Wide-area Measurement.” *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, no. 5:pgs. 52 –65, ISSN 1540-7977, doi: 10.1109/MPE.2008.927476.
- Phadke, A.G. & Thorp, J.S., *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications (Power Electronics and Power Systems)* (Springer, 2008), ISBN 0387765352.
- Phadke, A.G., Thorp, J.S. & Adamiak, M.G., 1983; “A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency.” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-102, no. 5:pgs. 1025 –1038, ISSN 0018-9510, doi:10.1109/TPAS.1983.318043.
- Ranganathan, Ananth, 2004; “The Levenberg-Marquardt Algorithm.” URL twiki.cis.rit.edu/twiki/pub/Main/AdvancedDipTeamB/the-Levenberg-marquardt-algorithm.pdf.
- Reactive Reserve Working Group (RRWG) , 2006; “Guide to WECC/NERC Planning Standards I.D: Voltage Support and Reactive Power.” Under the auspices of Technical Studies Subcommittee (TSS), Western Electricity Coordinating Council.
- Repo, S., Bastman, J. & Jarventausta, P., “Development of model based voltage stability margin approximation.” Em *Advances in Power System Control, Operation and Management, 2000. APSCOM-00. 2000 International Conference on*, vol. 1, pgs. 201 – 205 vol.1 (2000), doi: 10.1049/cp:20000392.
- Repo, S., Bastman, J. & Jarventausta, P., “Black-box model for on-line voltage stability assessment of power system—case study of the Finnish transmission grid.” Em *Proc. Fifth Int Power System Management and Control Conf. (Conf. Publ. No. 488)*, pgs. 291–296 (2002), doi:10.1049/cp:20020050.
- Roy, B. K. S., Sinha, A. K. & Pradhan, A. K., “Optimal phasor measurement unit placement for power system observability — A heuristic approach.” Em *Proc. IEEE Symp.*

Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG), pgs. 1–6 (2011), doi: 10.1109/CIASG.2011.5953335.

Sage, Andrew P. & Melsa, James L., *System Identification* (Academic Press Inc., 1971).

Semmaoui, H., Viscogliosi, N., Belanger, F., Michaud, J.-B., Pepin, C.M., Lecomte, R. & Fontaine, R., 2008; “Crystal Identification Based on Recursive-Least-Squares and Least-Mean-Squares Auto-Regressive Models for Small Animal Pet.” *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 5:pgs. 2450 –2454, ISSN 0018-9499, doi:10.1109/TNS.2008.2000860.

Shein, D. & Etzion, N., “Estimation methods for voltage stability limits in power systems.” Em *Electrical and Electronics Engineerings in Israel, 1995.,Eighteenth Convention of*, pg. 3.1.1/5 (1995), doi:10.1109/EEIS.1995.513814.

da Silva, A.J., da Fonseca Neto, J.V. & Nagem, N.F., “Parametric ARX Modeling of the Electrolytic Smelter Pot.” Em *Computer Modelling and Simulation, 2009. UKSIM '09. 11th International Conference on*, pgs. 217 –222 (2009), doi:10.1109/UKSIM.2009.94.

da Silva, L. C. P., da Costa, V. F. & Xu, W., “Preliminary results on improving the modal analysis technique for voltage stability assessment.” Em *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000.*, vol. 3, pgs. 1946–1950 vol 3 (2000).

da Silva, Luiz Carlos Pereira, Wang, Y., da Costa, Vivaldo Fernando & Xu, Wilson, “Assessment of generator impact on system power transfer capability using modal participation factors.” Em *IEE Proceedings on Generation, Transmission & Distribution*, vol. 149, pgs. 564–570 (2002), doi:10.1049/ip-gtd:20020464, URL <http://dx.doi.org/10.1049/ip-gtd:20020464>.

Sjöberg, Jonas, Zhang, Qinghua, Ljung, Lennart, Deylon, Albert Benvenisteand Bernard, yves Glorrenec, Pierre, Hjalmarssona, Hakan & Juditsky, Anatoli, 1995; “Nonlinear Black–Box Modeling in System Identification: a Unified Overview.” *Automatica*, vol. 31:pgs. 1691–1724.

Soliman, S. A., Temraz, H. K. & El-Khodary, S. M., “Power system voltage stability margin identification using local measurements.” Em *Proc. Large Engineering Systems Conf. Power Engineering*, pgs. 100–104 (2003).

- de Souza, Antônio Carlos Zambroni, Lopes, B.I. Lima, Guedes, R.B.L., Bretas, N.G., Martins, A.C.P. & Mello, L.F., “Saddle-node index as bounding value for Hopf bifurcations detection.” Em *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 152, pgs. 737–742 (2005).
- de Souza, Antonio C. Z., Cañizares, Claudio A. & Quintana, Victor H., 1997; “New Technique to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 12 No 3**:pgs. 1380–1387.
- Stefopoulos, George K., Yang, Fang, Cokkinides, George J. & Meliopoulos, A. P.Sakis, “Advanced Contingency Selection Methodology.” Em *Power Symposium, 2005. Proceedings of the 37th Annual North American*, pgs. 67–73 (2005), doi:10.1109/NAPS.2005.1560503.
- Sykes, J., Koellner, K., Premerlani, W., Kasztenny, B. & Adamiak, M., “Synchrophasors: A primer and practical applications.” Em *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2007. PSC 2007*, pgs. 213 –240 (2007), doi:10.1109/PSAMP.2007.4740914.
- Taylor, C. W., Erickson, D. C., Martin, K. E., Wilson, R. E. & Venkatasubramanian, V., 2005; “WACS-Wide-Area Stability and Voltage Control System: R&D and Online Demonstration.” *Proceedings of the IEEE*, **vol. 93**, no. 5:pgs. 892–906, doi:10.1109/JPROC.2005.846338.
- Taylor, Carson W., *Power System Voltage Stability* (McGraw-Hill Inc, 1994).
- Terzija, V., Valverde, G., Cai, Deyu, Regulski, P., Madani, V., Fitch, J., Skok, S., Begovic, M.M. & Phadke, A., 2011; “Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks.” *Proceedings of the IEEE*, **vol. 99**, no. 1:pgs. 80 –93, ISSN 0018-9219, doi: 10.1109/JPROC.2010.2060450.
- Terzija, Vladimir, “Wide Area Monitoring Protection and Control - WAMPAC.” Em *Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES 2007), 2007. ICTES. IET-UK International Conference on*, pgs. I–1 (2007), ISSN 0537-9989.
- Tiwari, A. & Ajarapu, Venkat, 2007; “Event Identification and Contingency Assessment for Voltage Stability via PMU.” *North American Power Symposium NAPS*, pgs. 413–420, URL <http://dx.doi.org/10.1109/NAPS.2007.4402343>.

- Torres, S. P., Peralta, W. H. & Castro, C. A., 2007; “Power System Loading Margin Estimation Using a Neuro-Fuzzy Approach.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 22**, no. 4:pgs. 1955–1964, doi:10.1109/TPWRS.2007.907380.
- Vargas, L.S. & Canizares, C.A., 2000; “Time dependence of controls to avoid voltage collapse.” *IEEE Transactions on Power Systems*, **vol. 15**, no. 4:pgs. 1367 – 1375, ISSN 0885-8950, doi: 10.1109/59.898114, URL <http://dx.doi.org/10.1109/59.898114>.
- Vladimír, Strejc, 1981; “Trends in identification.” *Automatica*, **vol. 17**, no. 1:pgs. 7–21, ISSN 0005-1098, doi:10.1016/0005-1098(81)90081-9, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109881900819>.
- Wang, Y., da Silva, L. C. P., Xu, W. & Zhang, Y., 2001; “Analysis of ill-conditioned power-flow problems using voltage stability methodology.” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, **vol. 148**, no. 5:pgs. 384–390, doi:10.1049/ip-gtd:20010424.
- Wang, Yang, Li, Wenyuan & Lua, Jiping, 2009; “A new node voltage stability index based on local voltage phasors.” *Electric Power Systems Research*, **vol. 79**:pgs. 265–271.
- Wen, He, Zhengyou, He & Ruikun, Mai, “A PMU-based Dynamic Fault Location Estimation for Transmission Lines.” *Em Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf. (APPEEC)*, pgs. 1–4 (2010), doi:10.1109/APPEEC.2010.5448423.
- Worden, K, Tomlinson, Author G R, Author, Yagasaki, K & Reviewer, *Nonlinearity in structural Dynamics: Detection, Identification and Modelling*, vol. 55 (ASME, 2002), doi: 10.1115/1.1451161, URL <http://link.aip.org/link/?AMR/55/B26/2>.
- Wu, Huaiyu, Sun, Dong & Zhou, Zhaoying, 2004; “Model identification of a micro air vehicle in loitering flight based on attitude performance evaluation.” *Robotics, IEEE Transactions on*, **vol. 20**, no. 4:pgs. 702 – 712, ISSN 1552-3098, doi:10.1109/TRO.2004.829442.
- Xu, Chao, Liang, Jun, Yun, Zhihao & Zhang, Li, 2005; “The Small-disturbance Voltage Stability Analysis through Adaptive AR Model Based on PMU.” *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*, pgs. 1–5, URL <http://dx.doi.org/10.1109/TDC.2005.1547097>.

- Yang, G.Y., Martin, K.E. & Ø andstergaard, J., “Investigation of PMU Performance Under TVE criterion.” Em *Critical Infrastructure (CRIS)*, 2010 5th International Conference on, pgs. 1 –7 (2010), doi:10.1109/CRIS.2010.5617541.
- Young, Peter C., *Recursive Estimation and Time-Series Analysis*, vol. XVII (Springer, 2011), doi:10.1007/978-3-642-21981-8.
- Zhao, Wen-Xiao, Chen, Han-Fu & Zheng, Wei Xing, 2010; “Recursive Identification for Nonlinear ARX Systems Based on Stochastic Approximation Algorithm.” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55, no. 6:pgs. 1287–1299, doi:10.1109/TAC.2010.2042236.
- Zhou, D.Q., Annakkage, U.D. & Rajapakse, A.D., 2010; “Online Monitoring of Voltage Stability Margin Using an Artificial Neural Network.” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 3:pgs. 1566–1574, doi:10.1109/TPWRS.2009.2038059.